DIRECTION GÉNÉRALE DES TERRES

LANDS DIRECTORATE

Environment CANADA Environnement
0021869I VOL ISS 50 870000
EXC # 001
HD 107 W6714
DOCUMENT DE TRAVAIL (CANADA. DIRECT
ION GENERALE DES TERRES)
OOFF

LES EFFETS DES PRÉCIPITATIONS ACIDES SUR LES TERRES HUMIDES

DOCUMENT DE TRAVAIL n° 50

RECHERCHE SUR LES PRÉCIPITATIONS ACIDES

Environnement Canada Environment Canada

Canada

LES EFFETS DES PRÉCIPITATIONS ACIDES SUR LES TERRES HUMIDES

JANET M. ANDERSON

RECHERCHE SUR LES PRÉCIPITATIONS ACIDES
DÉCEMBRE 1986

Direction générale des terres
Conservation et Protection
Environnement Canada

Document de travail
n° 50

90-03122/

© Ministre des Approvisionnements et Services
n° de catalogue EN73-4/50F
ISBN 0-662-94066-0

AVANT-PROPOS

Le présent rapport est le fruit des travaux effectués en vertu d'un contrat accordé par la Direction générale des eaux intérieures et par la Direction générale des terres du service Conservation et Protection d'Environnement Canada dans le cadre du programme sur le transport à grande distance des polluants atmosphériques (TGDPA). On y fait le point des connaissances actuelles sur la vulnérabilité des terres humides aux précipitations acides. On y résume également les projets actuels de recherche et on y formule des recommandations sur les recherches à effectuer. Ce rapport est destiné à orienter les activités du TGDPA à l'égard des terres humides.

Les personnes suivantes ont fait part de leurs observations et de leurs suggestions lors de la préparation du document : P. Blancher, Service canadien de la faune; E. Gorham, University of Minnesota; L. Lowe, Université de la Colombie-Britannique; C. Wren, Université de Toronto; V. Glooschenko et J. Riley, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario; J. Kerekes, Service canadien de la faune; D. McNicol, Service canadien de la faune; I. Kessel-Taylor et C. Rubec, Direction générale des terres et E. Wiken, Conservation et Protection. Je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes ces personnes pour leur précieux concours.

RÉSUMÉ

Les effets des précipitations acides sur les terres humides ne sont que récemment devenus le point de mire de recherches importantes. Le présent rapport offre un sommaire de l'information existante sur la vulnérabilité des terres humides aux précipitations acides et propose des recommandations quant aux recherches futures.

Le rapport est divisé en cinq sections majeures. La première présente un compte-rendu de la documentation sur les effets des précipitations acides sur l'hydrologie, l'hydrochimie, la végétation et la faune des terres humides. Beaucoup de chercheurs estiment que les données courantes sont insuffisantes et ne rendent possible qu'une approximation de l'irritabilité des terres humides aux pluies acides. Deuxièmement, quelques premiers critères visant à évaluer la vulnérabilité des terres humides aux précipitations acides, sont élaborés et utilisés pour classer les principales terres humides au Canada. On a déterminé que les tourbières minérotrophes et les marécages pauvres sont les plus vulnérables à l'acidification due aux pluies acides. La troisième section fournit un sommaire des études en cours dans l'est de l'Amérique du Nord concernant les effets des précipitations acides sur les terres humides. Quatrièmement un inventaire des tourbières de l'Ontario sert d'exemple pour une proposition d'évaluation régionale des effets de l'acidification des terres humides. Enfin, la dernière partie présente un sommaire et des recommandations d'études à effectuer.

ABSTRACT

The effects of acid precipitation on wetland have only recently become the focus of extensive research. This report summarizes existing information on the sensitivity of wetlands to acid precipitation and provides recommendations for future research.

The report consists of five major sections. 1) A review of the literature on the effects of acid precipitation on wetland hydrology, hydrochemistry, vegetation, and wildlife is presented. It is felt that current data remain sparse, such that it is only possible to approximate wetland sensitivity to acid precipitation. 2) Preliminary criteria with which to rate wetland sensitivity to acid precipitation are developed and used to rank the major wetland classes in Canada. Poor fens and poor swamps are determined to be the most sensitive to acidification by acid precipitation. 3) A summary of current research in eastern North America addressing the effects of acid deposition on wetlands is provided. 4) A peatland survey in Ontario is used as an example for a proposed regional evaluation of wetland acidification impacts. 5) A summary and recommendations for further research are presented.

Page

AVANT-PROPOS iii
RÉSUMÉ/ABSTRACT iv
LISTE DES TABLEAUX vi
LISTE DES FIGURES vi
1.0 INTRODUCTION 1
2.0 LES PRÉCIPITATIONS ACIDES ET LES TERRES HUMIDES : COMPTE-RENDU DE LA DOCUMENTATION 1
2.1 L'hydrologie et l'hydrochime des terres humides 3
2.2 La végétation des terres humides 5
2.3 La faune des terres humides 6
2.4 Conclusions 8
3.0 PREMIÈRE APPROXIMATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES TERRES HUMIDES AUX PRÉCIPITATIONS ACIDES 9
3.1 La vulnérabilité des terres humides 9
3.1.1 L'hydrologie 12
3.1.2 L'hydrochimie 12
3.1.3 La réaction des biotopes 13
3.1.4 Les facteurs temporels 14
3.2 L'indice de vulnérabilité des terres humides 15
3.3 Conclusions 17
4.0 LES RECHERCHES ACTUELLES SUR LES TERRES HUMIDES ET LES PRÉCIPITATIONS ACIDES 17
4.1 University of Minnesota, Department of Ecology and Behavioral Biology 20
4.2 Pêches et Océans Canada, Institut des eaux douces 22
4.3 Environnement Canada, Service canadien de la faune, région de l'Ontario 23
4.4 Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, Institut national de recherche sur les eaux 24
4.5 Ministère de l'Environnement de l'Ontario, Section des écosystèmes aquatiques 25
4.6 Université de Toronto, Institut d'études environnementales 25
4.7 Environnement Canada, Direction générale des terres 26
4.8 OTAN, atelier de recherches avancées sur les effets des précipitations acides sur les écosystèmes forestiers, agricoles et de terres humides, Toronto (Ontario) du 12 au 17 mai 1985 27
4.9 Atelier sur l'acidité organique, Environmental and Social Systems Analysis Ltd. (ESSA), St-Andrews (Nouveau-Brunswick), du 3 au 5 décembre 1985 28

Page

5.0 EXEMPLE D'UNE BASE DE DONNÉES SUR LES TERRES HUMIDES SERVANT A L'ÉVALUATION DES RESSOURCES RÉGIONALES MENACÉES : ONTARIO 28
5.1 Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Commission géologique de l'Ontario, Projet d'inventaire des tourbières 29
5.2 Conclusions 30
6.0 SOMMAIRE ET RECOMMANDATIONS 30
7.0 BIBLIOGRAPHIE 33
8.0 ANNEXE I - DÉFINITIONS ET CLASSES DES TERRES HUMIDES AU CANADA 39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Sommaire de la documentation sur les précipitations acides et les terres humides 10
Tableau 2. Classes de terres humides et vulnérabilité aux précipitations acides 18
Tableau 3. Faits saillants des recherches sur les précipitations acides et les terres humides effectuées dans l'est de l'Amérique du Nord jusqu'en 1985 19

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Modèle simplifié de terre humide 2

1.0 INTRODUCTION

L'Est du Canada, où les terres humides sont une composante majeure du paysage, reçoit les plus importantes quantités de polluants atmosphériques et de précipitations acides par année. Les six provinces de l'Est comptent près de 49 000 000 d'hectares de terres humides, soit 17 % de la superficie totale des terres de l'Est du Canada (Groupe de travail national sur les terres humides, 1986). Le terme "terres humides" définit une variété d'écosystèmes selon leur végétation, leur morphologie, leur hydrologie ou leurs propriétés chmimiques et qui sont répartis en cinq classes principales établies par Tarnocai (1980) (annexe I) : ce sont les tourbières ombrotrophes, les tourbières minérotrophes, les marécages, les marais et les terres légèrement submergées.

À ce jour, les terres humides de l'Est du Canada n'ont pas encore été classées dans les évaluations multidisciplinaires actuelles de la vulnérabilité au transport à grande distance des polluants atmosphériques (TGDPA) (Canada-États-Unis, 1983; Li, 1985; Cowell, 1986). Ces évaluations régionales ont été élaborées pour faciliter l'analyse des ressources menacées par les précipitations acides et aider à l'élaboration de programmes de surveillance des écosystèmes et de lutte contre le TGDPA.

C'est en 1980, dans le cadre du programme fédéral du TGDPA, que l'on a reconnu la nécessité d'effectuer des études sur les effets des précipitations acides de leurs interactions à l'intérieur des écosystèmes des terres humides (Cowell, 1980). On y proposait d'entreprendre une série d'études de surveillance à long terme des terres humides afin d'évaluer leur fonction écologique. Ces études devaient fournir des données de base permettant de déceler les changements provoqués par les précipitations acides dans les environnements de terres humides. Certains éléments de ces études de surveillance sont maintenant en place.

Le présent rapport offre un compte-rendu de la documentation existante et des recherches actuelles sur les effets des précipitations acides sur les terres humides. Ces données servent ensuite de base à une première estimation de la vulnérabilité des terres humides aux retombées acides. Les programmes, les études ou les ateliers actuels portant sur la recherche concernant les terres humides et les précipitations acides au Canada et aux États-Unis sont également résumés. Les organismes contactés couvrent un large éventail d'établissements d'enseignement, d'institutions gouvernementales et multidisciplinaires. Certaines recommandations d'ordre général à l'égard des recherches à effectuer sont également formulées.

2.0 PRÉCIPITATIONS ACIDES ET LES TERRES HUMIDES : COMPTE-RENDU DE LA DOCUMENTATION

Les terres humides sont des écosystèmes dont les cycles hydrologiques et biochimiques sont complexes. Ces cycles influencent ou modifient directement des facteurs biotiques comme le pH et l'oxygène dissous, qui, à leur tour, entraînent une réaction biotique particulière de la végétation et de la faune (Gooselink et Turner, 1978) (figure 1). Les précipitations acides peuvent perturber l'équilibre de tout un écosystème.

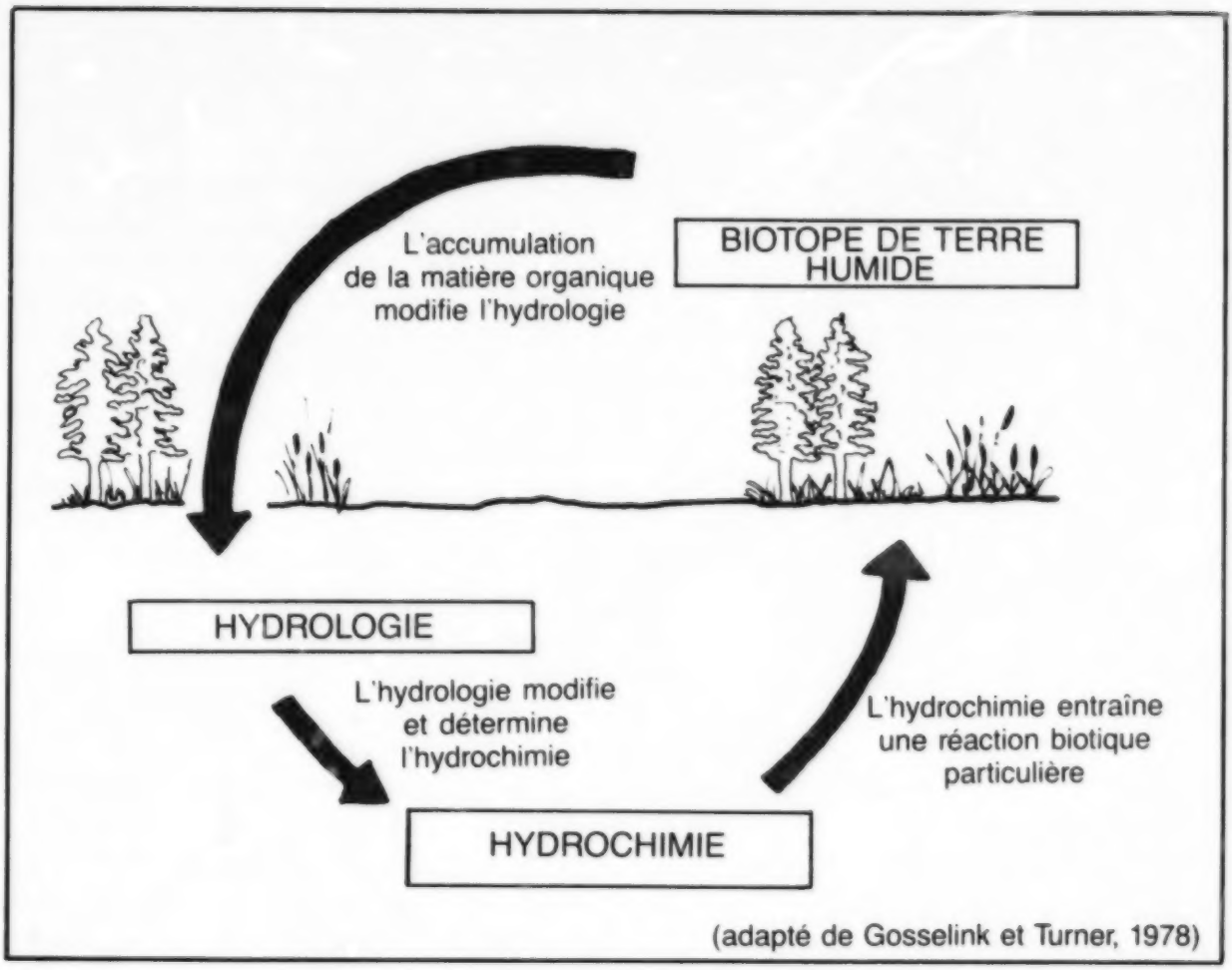

Figure 1. Un modèle simplifié de terre humide.
Les précipitations acides peuvent déséquilibrer ce cycle.

La présente section passe en revue la documentation existante sur les effets des précipitations acides sur l'hydrologie et l'hydrochimie, sur la végétation et sur la faune des terres humides.

Il est difficile de quantifier l'acidification anthropique des terres humides. La croissance et la décomposition de la végétation, comme celle de la Sphaigne (Sphagnum), rendent de nombreuses terres humides, notamment les tourbières ombrotrophes, naturellement plus acides.

Dans la présente étude, la vulnérabilité d'une terre humide à l'acidification par les précipitations acides est la diminution de son pH suite à l'apport d'une quantité donnée d'acidité. Le changement du pH est inversement proportionnel au pouvoir tampon, une mesure de la quantité d'acide ou de base nécessaire pour modifier le pH d'un sol d'une unité. Les terres humides dont le pouvoir tampon est faible, sont donc très vulnérables à l'acidification, et inversement les terres humides à pouvoir tampon élevé sont peu vulnérables. Le potentiel de neutralisation de l'acidité provenant des précipitations acides est fonction de substrat du sol, de l'hydrolgie, de l'hydrochimie et de la végétation d'une terre humide.

2.1 L'hydrologie et l'hydrochimie des terres humides

Plusieurs études, portant sur l'hydrologie et l'hydrochimie des terres humides effectuées tant en Europe qu'en Amérique du Nord, ont établi une relation entre une diminution du pH des terres humides, notamment des tourbières, et les précipitations acides. Une étude lysimétrique effectuée par Braekke (1978) a déterminé que l'acidité des eaux drainant une tourbière oligotrophe augmentait comparativement à celle d'une tourbière eutrophe à la suite de l'apport d'eaux acides (pH de 2,0), et que le pouvoir tampon de la tourbe eutrophe était beaucoup plus élevé. Ce phénomène a été attribué au pouvoir d'échange cationique plus fort et aux réactions de rédox de la tourbe.

Braekke, dans des études ultérieures sur le terrain (1980a; 1980b), a établi que la zone phréatique dans une tourbière est un milieu capteur de sulfate et d'autres minéraux, et dans laquelle les conditions anaérobies réduisent le sulfate en sulfure.

Certains auteurs ont établi une relation étroite entre le pH et la proportion d'anions sulfate dans les eaux de drainage des terres humides du New Jersey (Johnson, 1979), dans les mares de tourbières ombrotrophes en Angleterre (Gorham, 1958) et en Belgique (Vangenechten, 1981). On peut donc supposer que les acides dominants de ces eaux sont des acides minéraux plutôt qu'organiques (acides humiques et fulviques).

Des chercheurs d'Angleterre ont étudié l'évolution et le cheminement des précipitations acides dans un petit bassin versant, comprenant une tourbière ombrotrophe (Rippon et al, 1980). Ils ont mesuré les principaux polluées (sulfate, nitrate, ion hydrogène et acides organiques) dans les précipitations globales et dans les eaux de lessivage ainsi que dans l'eau du sol et du cours d'eau drainant la tourbière ombrotrophe. Les résultats révèlent que les composés sulfureux se transforment dans la tourbière. Les cours d'eau drainant la tourbière ombrotrophe ont une teneur en sulfate inférieure à celle des eaux de ruissellement en surface. Ils ont présumé que les

bactéries sulfato-réductrices transforment le sulfate en sulfure d'hydrogène.

Une étude publiée sur le bilan ionique d'une terre humide fait partie d'une recherche globale effectuée par Hemond (1980) sur la biogéochimie de la tourbière ombrotrophe de Thoreau au Massachussetts. Il a été établi que le nitrate et le sulfate subissaient des transformations importantes dans la tourbière ombrotrophe. L'apport annuel de nitrate et de sulfate dépassait d'un facteur de trois à quatre leur élimination. Hemond laisse entendre qu'une grande partie des nitrates se transforme soit par absorption biologique soit par dénitrification. De même, les sulfates sont également transformés par absorption biologique ou par réduction en sulfure d'hydrogène qui retourne dans l'atmosphère sous forme gazeuse.

Bien que le système de tourbière ombrotrophe soit capable de neutraliser les effets des précipitations de plus en plus acides, Hemond a admis qu'il existe une limite théorique au pouvoir de protection du système. Une augmentation de l'acidité des précipitations causerait un accroissement de la réduction des sulfates, entraînant probablement la présence de concentrations toxiques de sulfure d'hydrogène dans les eaux à libre écoulement de la tourbière ombrotrophe.

Des récents travaux effectués par Gorham et al (1985) corroborent les conclusions de Hemond. Il a été observé que, du Minnesota à Terre-Neuve, la tourbe superficielle très acide des tourbières ombrotrophes avaient des teneurs beaucoup plus faibles en sulfate d'ammonium et en ions nitrate que les précipitations. Certains estiment que l'absorption végétale et la réduction chimique sont la cause de l'élimination de ces ions. Les acides minéraux sont remplacés par des acides organiques qui sont le résultant de la décomposition de la Sphaigne (Sphagnum), de sorte que les eaux de la tourbière ombrotrophe ont un pH variant de 3,7 à 4,7.

Urban et al (1985), dans un examen ultérieur des données recueillies par Gorham et al (1985), ont mis en évidence un degré d'impact qui semble être en corrélation avec l'apport d'acide. Il s'ensuivrait donc que le pouvoir des tourbières ombrotrophes de neutraliser les effets du dépôt d'acide est appréciable mais limité.

Certains faits permettent également de supposer que des acides minéraux peuvent prédominer dans la tourbière ombrotrophe. Gorham (1967) signalait que l'acide sulfurique contenu dans la pluie polluée était la source dominante d'ions hydrogène dans les eaux de surface de sept tourbières ombrotrophes britanniques, comme l'indiquaient l'analyse du bilan de charge et de corrélation observée entre les teneurs en sulfate et en ions hydrogène.

Une étude effectuée par la Direction de la faune du ministère des Richesses naturelles de l'Ontario et portant sur les terres humides situées près de Sudbury établit une différence entre l'acidité causée par des sulfates d'origine anthropique et celle provenant de sources naturelles (p. ex., les acides humiques de la tourbe). Les bilans de charge de 47 échantillons d'eau ont été établis. Ils montraient que les sulfates contribuaient davantage à l'acidité de ces eaux que les acides organiques. La teneur en anions sulfate était en moyenne 31,6 fois supérieure à celle des anions acides organiques. Les données existantes permettent de supposer que le sulfate

était de source anthropique plutôt que géologique (Glooschenko et Stevens, 1985).

Les acides organiques ne sont pas la seule cause d'un faible pH. Des acides organiques faibles, l'échange d'ions et les acides minéraux provenant des précipitations acides ou de l'oxydation in situ des composés sulfureux ayant subi une réduction peuvent tous être des facteurs déterminants du pH dans les systèmes de tourbières om brotrophes.

Vitt et Bayley (1984) ont étudié la chimie de l'eau de quatre fondrières de bassins oligotrophes du nord-ouest de l'Ontario pour obtenir des données de base pour de futures expériences sur les précipitations acides. Ils ont prélevé des échantillons d'eau de surface à l'entrée et à la sortie d'une tourbière ombrotrophe, et analysé leur teneur en ions hydrogène et en sulfate. Ils ont découvert que les teneurs en sulfate de l'eau étaient considérablement réduites après leur passage dans la tourbe de surface et la végétation, et que les concentrations d'ions hydrogène avaient augmenté. D'après ces résultats, il semble justifié de supposer que l'absorption biolotique et la réduction chimique mentionnées précédemment sont responsables de l'élimination de ces cations et anions. Les résultats que produiront les expériences futures portant sur les perturbations seront très importants pour déterminer la réaction des terres humides aux précipitations acides.

Les chercheurs, s'intéressant aux précipitations acides, accordent de plus en plus d'attention aux effets de celles-ci sur l'hydrologie et l'hydrochimie des terres humides. Il a été difficile, jusqu'ici, de rejeter ou d'accepter l'hypothèse selon laquelle les précipitations acides sont une source de stress pour les terres humides. Certaines études examinées dans le présent rapport permettent de supposer que l'hydrologie des terres humides s'adapte à l'acidité contenue dans les précipitations (Rippons et al, 1980; Hemond 1980; Gorham et al, 1985). D'autres études révèlent toutefois que le régime hydrochimique des terres humides est déséquilibré par les précipitations acides (Braekke, 1980a, 1980b; Vangenechten, 1981; Gorham, 1967; Glooschenko et Stevens, 1985).

2.2 La végétation des terres humides

Rares sont les études qui ont traité des effets des précipitations acides sur la végétation des terres humides. La disparition de plusieurs espèces de Sphagnum de la vaste couverture végétale des tourbières ombrotrophes de couverture du sud des Pennines en Grande-Bretagne a été signalée en premier par Taillis (1964). D'autres études effectuées par Ferguson et al (1978) ont montré que certaines espèces de Sphagnum subissaient un ralentissement sensible de croissance ainsi qu'une diminution générale de rusticité lorsqu'elles étaient exposées, en laboratoire, à des concentrations ambiantes de précipitations acides.

Van Dam et al (1980) ont rédigé un rapport sur les changements qui se sont produits, de 1920 à 1978, dans les mares des landes hollandaises. Des données sur le plancton, recueillies il y a une cinquantaine d'années, ont été comparées à des données prélevées récemment dans seize mares des Pays-Bas. On a observé une augmentation importante des diatomées acidobiotiques. Elle coïncide avec une diminution du pH de l'eau qui est passé de 4,0-6,0 à 3,7-4,6. Ces résultats permettent de supposer que les précipitations acides ont entraîné

un changement dans les populations de diatomées. Seules les espèces les plus résistantes ont pu survivre avec pour conséquence une réduction de la diversité au sein d'une même marge, et des différences entre les mares.

La plupart des recherches concernant les effets des précipitations acides sur la végétation ont été axées sur les cultures agricoles et les forêts. À des expériences simulées de pluies acides, les recherches effectuées jusqu'ici ont confirmé la variabilité des réactions des plantes selon les espèces, à l'environnement et la méthode d'exposition. Grâce à ces travaux, nous commençons à brosser un tableau général des effets des précipitations acides sur la végétation (Cowling, 1979). Il est utile de récapituler les réactions générales des plantes aux retombées acides, car des effets similaires pourraient se produire chez les Cyperacées, les Herbacées, les Roseaux et les Éricacées qui sont des plantes caractéristiques des terres humides.

Les lésions visibles qui ont été observées, lorsque le pH des précipitations simulées tombait en-dessous de 3,4, sont généralement situées à la base des trichomes, dans les cellules stomatiques et dans les cellules épidermiques recouvrant les tissus vasculaires. La modification des fonctions habituelles de ces cellules peut altérer l'échange gazeux chez les plantes, rendant le feuillage exposé plus sujet au flétrissement. L'accélération du lessivage des éléments nutritifs des feuilles des plantes ainsi que la réduction de la productivité générale par suite d'une perturbation d'une fonction métablique normale ont été démontrées. L'inhibition de la pollinisation de plusieurs essences forestières a été observée lors d'essais <u>in vitro</u> avec différents niveaux ambiants d'acidité (Cox, 1983). Ces données ont été recueillies dans le cadre d'essais effectués en laboratoire ou dans des serres. La plupart des essais sur le terrain n'ont pas donné de résultats définitifs sur les changements de la productivité des plantes ou leur taux de survie à la suite de précipitations acides (Evans, 1982). Certains estiment que les changements sont peut-être si faibles qu'ils peuvent être masqués par les fluctuations annuelles naturelles du climat (Hutchinson et Havas, 1980).

Une série de stations de survaillance de la végétation ont été créées dans tout le Canada pour les Sphagnum. Il a été montré que ces mousses présentaient des configurations régionales d'absorption (par dépôt) de métaux lourds. On procède actuellement à l'extrapolation de ces résultats à des évaluations du TGDPA (W.A. Glooschenko, communication personnelle).

La documentation sur les effets des précipitations acides sur le fonctionnement naturel de la végétation des terres humides n'est ni complète ni concluante. Les études citées ici révèlent qu'elles subissent une certaine altération ou un certain stress, mais il faudra effectuer davantage de recherches dans ce domaine, notamment des études sur le terrain, avant de pouvoir tirer des conclusions plus définitives.

2.3 <u>La faune des terres humides</u>

La documentation pertinente à l'impact des dépôts acides sur la faune des terres humides est encore très limitée. Toutefois, les connaissances sur certains aspects de l'écologie de la faune des terres humides, comme l'habitat physique ou la chaîne alimentaire,

permettent de supposer certains modes d'influence des précipitations acides sur l'écosystème. Ce savoir est précieux pour orienter les efforts de recherche sur ces sujets (comme le souligne de façon plus détaillée la section 4.3 du présent rapport).

Le Service canadien de la faune prépare actuellement une étude des effets des précipitations acides sur la faune des terres humides (Blancher, 1985a, 1985b). Des fonctions physiologiques comme la régulation du sodium et du calcium, la respiration et l'équilibre acido-basique, qui sont toutes altérées par un faible pH, sont des réactions mesurables des animaux aquatiques à l'acidification. Les animaux soumis au stress d'un milieu à pH perturbé, notamment les amphibiens, ont diverses réactions dont une altération des fonctions de reproduction et de croissance, des déformations osseuses et une plus grande mortalité (Blancher, 1985b).

On prévoit que l'effet le plus important des précipitations acides sur la faune des terres humides se manifestera indirectement sur leur habitat. Les perturbations peuvent être de plusieurs sortes. La première est l'augmentation éventuelle des teneurs en métaux lourds des habitats fauniques. Dans un milieu à pH faible, certains métaux lourds (Al, Fe, Mn,Zn, Hg) ont tendance à se solubiliser dans les sols et ceux des sédiments à être mobilisés; d'autres sont des contaminants secondaires des précipitations (Cu, Ni, Pb, Zn, Cd) (Havas, 1980). Ces phénomènes pourraient contribuer à créer un environnement toxique pour la faune des écosystèmes terrestres ou des terres humides. Un relevé sur le terrain des habitats des amphibiens dans quarante étangs éphémères des terres humides de la région de Killarney adjacente à celle de Sudbury en Ontario, a révélé que l'aluminium total, le fluorure d'aluminium et l'aluminium monomérique inorganique empêchaient leur reproduction dans vingt pour cent des étangs examinés (Glooschenko et al 1985a). En suède, on a observé que les élans vivant près des sources de pollution présentaient des concentrations élevées de cadmium dans leurs tissus (Frank et al, 1981; Mattson et al, 1981). En 1984, une étude préliminaire a montré que les concentrations de cadmium dans les tissus d'originaux de l'Ontario étaient jusqu'à trois fois supérieures à celles relevées dans les études de Suède (Glooschenko et al, 1985b). Il reste, toutefois à démontrer si les concentrations accrues de métaux chez ces animaux ont des effets préjudiciables sur leur santé.

Un autre facteur qui peut indirectement toucher la faune des terres humides est la possibilité d'un changement dans la disponibilité de la nourriture dû aux effets des précipitations acides sur la chaîne alimentaire. Des observations initiales effectuées dans les lacs corroborent cette hypothèse. DesGranges (1982, 1985) et DesGranges et Darveau (1985) qui ont effectué des recherches sur les effets des précipitations acides sur les oiseaux aquatiques au Québec, ont observé une corrélation positive entre l'abondance d'oiseaux aquatiques et le pH des lacs. Il est présumé que la diminution de la quantité de nourriture disponible dans les lacs acides était la cause de la baisse de leur fréquentation par les oiseaux. Il a été établi que les lacs acides étaient rarement fréquentés par les oiseaux aquatiques.

Des études des lacs récememnt effectuées par McNicol et al, (1985) dans la région de Wanapitei en Ontario, près de Sudbury, exposée à une forte charge de pluies acides révèlent

une réduction dans l'abondance de poisson et de leur fréquentation de ces lacs. Cette situation a elle-même diminué la capacité de ces habitats d'accueillir les couvées d'oiseaux piscivores comme le Grand Bec-scie (Mergus merganser). Les oiseaux aquatiques insectivores comme le Garrot à l'oeil d'or (Bucephala clangula) préfèrent les lacs sans poisson, indépendamment de leur niveau d'acidité, semblant tirer des avantages à court terme d'une baisse de la compétition avec le poisson pour les insectes. Un résumé, l'acidification des lacs a eu des effets variés et contraires sur les diffé rentes espèces d'oiseaux aquatiques, selon leur habitat nourricier.

Glooschenko et al, (1985c) ont étudié le Turan tritri (Tyrannus tyrannus qui niche dans les terres humides ou près de celles-ci, ou dans la zone littorale des lacs. Les résultats montrent une étroite association entre la chimie de l'eau, la qualité des oeufs et le taux de croissance des os du Tyran. La perte de poids des oeufs et les taux de croissance des os ont été corrélés avec le sulfate, le nitrate, l'alcalinité et le pH. Ils n'ont toutefois établi aucun lieu de cause à effet ni aucune preuve d'une diminution grave du potentiel reproductif liée à l'interférence éventuelle de l'aluminium avec le métabolisme du calcium et du phosphore chez la femelle. Il n'a pas été montré que l'acidité des lacs était un facteur limitant la prédation.

En résumé, les précipitations acides ont le pouvoir de modifier la faune des terres humides directemnt par les changements physiologiques qu'elles entraînent et indirectement par des transformations de l'habitat. Il est nécessaire de poursuivre les recherches pour déterminer de façon positive les points d'impact.

2.4 Conclusions

La documentation nous permet de formuler les énoncés généraux suivants au sujet de l'impact environnemental des précipitations acides sur les terres humides.

1. Les études sur le terrain ont été axées sur l'hydrochimie des tourbières qui, comme il a été démontré, sont des zones de piégeage des ions sulfate, nitrate et ammonium contenus dans les précipitations acides. On suppose que les apports de sulfate et de nitrate sont éliminés par absorption végétale et réduction microbienne, même si, de toute évidence, ces phénomènes ont leurs limites.

2. Les études en laboratoire révèlent que les mousses des tourbières ombrotrophes Sphagnum spp.) sont altérées par les précipitations acides simulées à des niveaux de pH ambiants. Étant donné le peu de recherches effectuées jusqu'ici sur les répercussions particulières des précipitations acides sur la végétation des terres humides, il est nécessaire d'extrapoler les résultats d'études portant sur la végétation terrestre à la végétation des terres humides.

3. Nous ne disposons pas encore de preuves à l'appui suffisantes pour faire des déclarations fondées sur les effets des précipitations acides sur l'habitat et les espèces fauniques des terres humides. On prévoit que leur impact sur la faune des terres humides sera indirect, se manifes-

tant par des modifications de l'habitat et des sources de nourriture.

En résumé, certaines recherches montrent que le fonctionnement normal des terres humides est modifié par les précipitations acides, tandis que d'autres résultats révèlent la nature homéostatique de ces écosystèmes (tableau 1).

Ces recherches se diversifient maintenant pour aborder l'importance intrinsèque de ces écosystèmes et leur rôle dans les liens vitaux terre-eau.

3.0 PREMIÈRE APPROXIMATION DE LA VULNÉRABILITÉS DES TERRES HUMIDES AUX PRÉCIPITATIONS ACIDES

D'après la documentation, il est seulement possible d'établir quelques premiers critères pour déterminer la vulnérabilité des terres humides, leur pouvoir tampon et pour indiquer les classes de terres humides qui pourraient être menacées par l'acidification causée par les précipitations acides. La présente section examine la vulnérabilité des terres humides sur les plans hydrologique, hydrochimique, biotique et temporel.

3.1 La vulnérabilité des terres humides

L'apport anthropique, le climat, les événements épisodiques naturels, la topographie, les sols, la géologie et la biocénose sont des facteurs importants pour déterminer la vulnérabilité d'une terre humide aux précipitations acides (National Academy of Sciences, 1981). Les trois premiers facteurs sont extrinsèques à l'écosystème tandis que les quatre derniers sont considérés comme des caractéristiques intrinsèques.

Les facteurs extrinsèques ont fait l'objet d'une attention considérable (p. ex. Canada/États-Unis, 1983; Schnoor, 1984) et leur influence sur la vulnérabilité des écosystèmes a été reconnue. L'apport anthropique est la cause de l'acidité des précipitations. Il provient de l'utilisation de l'énergie faite par les milieux urbains et industriels et du degré de réglementation des émissions atmosphériques. Le climat influe sur la quantité de précipitations polluées qui retombent sur un écosystème, car il détermine la quantité de précipitations, la direction et la vitesse de déplacement des masses d'air. Les événements épisodiques naturels, comme les éruptions volcaniques et les incendies, contribuent dans une moidre mesure aux précipitations acides. Ces critères extrinsèques doivent être pris en compte lors de la détermination de la vulnérabilité des terres humides, ou, en fait, de tout écosystème, aux précipitations acides. Ces critères ne seront toutefois pas examinés davantage parce qu'ils ne touchent pas uniquement les terres humides.

Contrairement aux critères extrinsèques, nous ne disposons que de très peu de données sur la façon dont les facteurs intrinsèques influent sur la vulnérabilité des terres humides aux précipitations acides. Des caractéristiques topographiques comme la profondeur de l'eau et les régimes de l'écoulement déterminent les trajectoires hydrologiques des retombées acides et leur interaction avec les interfaces végétation-sédiments dans une terre humide. Le régime hydrochimique des terres humides est directement soumis à l'influence de facteurs tels que la lithologie de l'assise rocheuse, la chimie et la texture des dépôts géologiques superficiels, et la nature du sol et de la tourbe. Les biotopes sont souvent des indicateurs sensibles de changement ainsi

Tableau 1: Sommaire de la documentation sur les précipitations acides et les terres humides

Auteur (année de publication	Lieu de l'étude	Effet(s) sur les terres humides, sujet(s) traité(s)
Hydrochimie		
Braekke (1978, 1980a, 1980b)	Norvège	. migration des ions dans la tourbe . taux de renouvellement du soufre dans la tourbe . réaction de l'eau des tourbières
Vangenechten (1981)	Belgique	. composition physiochimique des eaux de tourbières . modifications historiques de l'alcalinité
Rippon et al (1980)	Angleterre	. modification de la chimie des eaux acides s'écoulant dans une tourbière ombrotrophe . réduction microbienne du sulfate
Hemond (1980)	Massachussetts (E-U.)	. bilan ionique dans les tourbières ombrotrophes
Gorham et al (1985); Urban et al (1985)	Minnesota à Terre-Neuve (Canada/E-U.)	. variations régionales de la chimie des tourbières minérotrophes . bilan ionique dans les tourbières ombrotrophes
Glooschensko et Stevens (1985)	Nord de l'Ontario	. bilans de charge dans les terres humides
Vitt et Bayley (1984)	Nord-ouest de l'Ontario (Canada)	. chimie et phénomènes d'acidification des terres humides
Végétation		
Tallis (1964); Ferguson et al (1978)	Angleterre	. effets sur les Sphagnum spp.
Van Dam et al (1980)	Pays-Bas	. modification historique des populations de diatomées dans les mares des landes
Cowling (1983)	É.-U.	. effets sur le taux de croissance/les fonctions de la flore
Cox (1978)	É.-U.	. inhibition de la pollinisation des espèces floristiques
Evans (1982); Hutchinson et Havas (1980)	É.-U.	. modifications et perturbations de la végétation

Auteur (année de publication	Lieu de l'étude	Effet(s) sur les terres humides, sujet(s) traité(s)
Faune		
Blancher (1985a, 1985b)	Nord de l'Ontario (Canada)	. effets sur les biotopes
Glooschenko et al (1985a)	Nord de l'Ontario (Canada)	. effets sur les amphibiens
Glooschenko et al (1985b)	Nord de l'Ontario (Canada)	. effets sur l'original
Frank et al (1981); Mattson et al (1981)	Suède	. effets sur l'élan, le cerf et le lièvre
DesGranges (1982, 1985)1 DesGranges et Darveau (1985)	Québec (Canada)	. effets sur les oiseaux aquatiques
McNicol et al (1985)	Nord de l'Ontario (Canada)	. effets sur les poissons et les oiseaux
Glooschenko et al (1985c)	Nord de l'Ontario (Canada)	. effets sur les oiseaux

que des médiateurs des phénomènes qui modifient les retombées acides (p. ex. microbes et cycles biogéchimiques).

3.1.1 L'hydrologie

L'hydrologie des terres humides modèle, ou influence étroitement, les phénomènes qui y interviennent (Carter et al, 1978). La présence de l'eau, son déplacement, sa qualité et sa quantité, dictent le mode d'interaction des substances d'origine hydrique avec les sols et les biotopes des terres humides. Ces critères hydrologiques déterminent la capacité d'une terre humide à atténuer les effets des retombées acides en donnant accès à des sources tampon potentielles au sein de la terre humide (Bache, 1984). Les paramètres hydrologiques des terres humides jouant un rôle important dans la neutralisation des retombées acides comprennent l'écoulement de l'eau, le lessivage ou le taux de renouvellement, et les variations saisonnières et annuelles de la profondeur de l'eau (Kaldec et Kaldec, 1979).

L'écoulement de l'eau, tel que déterminé par le lessivage ou le taux de renouvellement des eaux d'apport, conditionne le degré de contact de ces eaux avec les substrats d'une terre humide (Glaser et al, 1981). Les eaux vives interagissent de façon différente des eaux stagnantes; il en va de même pour l'écoulement superficiel et souterrain. On laisse entendre qu'un débit qui maximise l'interaction des précipitations acides avec des sources tampon potentielles, fait diminuer la vulnérabilité des terres humides. Par contre, la présence de phénomènes comme "l'écoulement souterrain" et le pergélisol minimisent le contact des eaux de la terre humide avec les substrats du sol, augmentant ainsi la vulnérabilité de la terre humide. L'écoulement de surface est un écoulement rapide et concentré dans des microchenaux naturels creusés par l'érosion, les animaux ou les racines. De tels chenaux prédominent dans les terres humides, notamment les marécages. Braekke (1981) a observé que près du tiers des eaux drainant un petit bassin versant du sud de la Norvège avait été "court-circuité" et n'avait en aucune interaction avec le sol.

Le pergélisol augmente également l'écoulement de l'eau à travers une terre humide en limitant le volume du substrat accessible à la venue d'eau. L'écoulement de l'eau dans de nombreuses tourbières du nord pergélisolées est limité à la surface de sorte que l'eau de porosité interstitielle ne sera vraisemblablement pas importante comme réservoir de neutralisation de l'alcalinité (Gorham et al, 1984).

Tous reconnaissent l'influence du régime hydrologique des terres humides sur la qualité générale de l'eau (Goode et al, 1975). Toutefois, l'hypothèse selon laquelle il influence également la vulnérabilité d'une terre humide devra être prouvée par d'autres observations sur le terrain comme celles de Braekke (1981).

3.1.2 L'hydrochimie

Les constituants organiques et minéraux d'une terre humide déterminent son hydrochimie ou sa composition sol-eau. L'hydrochimie est un facteur clé régissant la vulnérabilité et est fonction des phénomènes chimiques suivants : 1) L'effet tampon des bicarbonates; 2) les réactions d'échange cationique; et 3) le phénomène d'oxydo-réduction (rédox au niveau et au-dessous de la nappe phréatique. Nous

examinons chacun de ces phénomènes en fonction de leur pouvoir de neutralisation des effets des précipitations acides.

Les eaux des terres humides dont le pH est supérieur à 5,0, sont dotées d'une capacité tampon des bicarbonates (Wetzel, 1975). Les ions hydrogène qui arrivent dans ces eaux seront consommés aussi longtemps que l'alcalinité sous forme de carbonates, de bicarbonates et d'hydroxides s'y trouvera en quantité suffisante. Les espèces de bicarbonates et de carbonates présentes sont fonction du pH; elles cessent donc de prédominer lorsque les eaux ont un faible pH. Par conséquent, l'effet tampon des bicarbonates est faible ou inexistant dans les terres humides acides comme les tourbières ombrotrophes. De même, ce système tampon disparaîtra des terres humides qui subissent une acidification anthropique lorsque leur pH baisse à moins de 5,0.

Les réactions d'échange cationique font intervenir l'échange de cations en solution (p. ex., les ions hydrogène contenus dans les précipitations acides), avec les cations métalliques présents sur les surfaces à charge négative des sols et de la tourbe. Ces cations, en présence d'ions hydrogène, passent en solution et neutralisent ou font même augmenter le pH de la solution acide (Shilts et al, 1981). L'effet neutralisant du pouvoir d'échange cationique est fonction de la nature du cation de saturation et de la nature et du pH des solutions de départ. Le pouvoir d'échange cationique diminue proportionnellement à l'abaissement du pH (Clymo, 1983). La teneur en matières organiques et le degré de décomposition de la tourbe et du sol influenceront fortement le pouvoir d'échange cationique (Gorham, 1967). Lorsque les sites d'échange sont saturés par des ions hydrogène, la capacité de neutralisation des apports acides devient négligeable.

Les phénomènes d'oxydo-réduction, ou rédox, se produisent au niveau ou au-dessous de la nappe phréatique, et sont déterminés par les microbes. La réduction de sulfate et la dénitrification sont deux phénomènes de rédox qui peuvent diminuer l'acidité des terres humides. Le sulfate est absorbé par des processus biologiques ou réduit en sulfure d'hydrogène (Hemond, 1980; Gorham et al, 1984). De même, l'excès de nitrate est transformé par absorption biologique ou dénitrification. La mesure dans laquelle ces processus peuvent réussir à compenser une augmentation des teneurs en sulfate et en nitrate des précipitations, est toutefois théoriquement limitée (Hemond, 1980; Gorham et al, 1984; Urban et al, 1985).

Des variations dans la profondeur de l'eau peuvent influer sur le processus d'acidification en modifiant les conditions dans lesquelles les phénomènes de rédox se produisent. En période de sécheresse, les rabattements entraînent l'aération des sols et de la tourbe habituellement anoxiques, ce qui peut oxyder le soufre organique ou les sulfures métalliques pour former des acides sulfuriques (Gorham et al, 1984). L'aluminium et des substances humiques pourraient être à l'origine d'autres effets tampon chimiques, mais leur capacité de résistance à l'acidification n'a pas été mesurée (Gorham et al, 1984).

3.1.3 La réaction des biotopes

Un examen de la documentation révèle que le rôle et la dynamique de la végétation et des organismes peuvent être un indicateur et un

agent de modification importants de la vulnérabilité des écosystèmes des terres humides. L'étude de ces deux caractéristiques s'est avérée très utile pour la recherche sur les précipitations acides car les écosystèmes subissant les retombées acides sont exposés à des stress multiples (p. ex. surplus d'acide, d'azote et de soufre) pendant une période de temps prolongée.

La réaction biologique peut être étudiée à trois niveaux : 1) la composition floristique/faunique; 2) la morphologie et 3) les éléments chimiques constituants (grigal, 1972). L'analyse de la flore et de la faune des terres humides révèle des modifications distinctes dans la nature des communautés végétales et animales le long de gradients naturels d'acidité (Gorham et al, 1984). On peut donc supposer que l'étude des organismes d'une terre humide indiquerait si celle-ci subit ou non une acidification. Certains estiment que les bryophytes et les algues microscopiques sont souvent les espèces végétales les plus vulnérables, tout comme le sont les petits invertébrés comme les escargots (Gorham et al, 1984). Les amphibiens sont également identifiés comme une espèce vulnérable à l'acidification et pourraient donc être un indicateur (Glooschenko et al, 1985a).

3.1.4 Les facteurs temporels

L'étude des terres humides doit prendre en compte le fait que les phénomènes hydrologiques et hydrochimiques agissent dans le temps. Le changement et le stress ne deviennent pas nécessairement évidents après l'intervention d'une force externe comme les précipitations acides (Livingston et Loucks, 1979). Il est important d'établir des différences entre les phénomènes décelables à court terme et à long terme. La présente section traitera de l'effet cululatif de ces critères hydrochimiques et biologiques.

La capacité des systèmes tampon de certaines terres humides comme les tourbières minérotrophes pauvres est limitée. À court terme (c'est-à-dire sur plusieurs années), le système devrait vraisemblablement neutraliser les effets des précipitations acides. Toutefois, une exposition chronique à ce stress entraînera probablement une saturation des sources de neutralisation et l'acidification deviendra évidente en moins d'une décennie (E. Gorham, comm. pers.). Les études hydrochimiques doivent prendre en compte cette capacité d'assimilation des terres humides, en d'autres termes, la Capacité à dissimuler ou à éviter les effets à court terme (Likens et Bormann, 1974).

L'étude des terres humides se préoccupe également de la modification à long terme des cycles hydrochimiques. Ces cycles peuvent avoir des fréquences différentes (diurne, saisonnière, annuelle, historique) et présenter plusieurs échelles de variabilité temporelle (Kadlec et Kadlec, 1979). Il est tions à long terme entraînées par un facteur comme les précipitations acides et il faudra peut-être déterminer un taux moyen de modification de l'amplitude de la variation cyclique normale.

La réaction biologique aux précipitations acides demande elle aussi, du temps pour se manifester. L'étude des effets des précipitations acides sur les espèces vivaces des terres humides rend ce phénomène particulièrement évident car, à moins d'une cummulation d'effets, les modifications seront lentes

(Hutchinson et Havas, 1980). Ce phénomène est en grande partie dû à la profondeur de la zone d'enracinement des plantes où les changements d'acidité peuvent être moins prononcés. Elles peuvent donc présenter ce que Gorham (1957) a appelé "l'inertie biologique".

Ainsi, la vulnérabilité d'une terre humide aux précipitations acides est une affaire de temps car les critères descriptifs les plus importants de la vulnérabilité sont eux-mêmes soumis au temps. Il est essentiel de prendre en compte ce facteur lors de l'élaboration d'expériences destinées à évaluer l'impact des pluies acides sur les terres humides.

3.2 Un indice de vulnérabilité des terres terres humides

Les cinq classes principales de terres humides (tourbière ombrotrophe, tourbière minérotrophe, marécage, marais et terres légèrement submergées) "pauvres" ou "riches" en éléments nutritifs ont été divisées en quatre catégories de vulnérabilité en fonction des facteurs intrinsèques susmentionnés. Cette classification est une évaluation progressive, relative à la vulnérabilité aux pluies acides telle que proposée par Kessel-Taylor (1985). Elle est en grande partie de nature subjective et devra être vérifiée par des expériences et des observations sur le terrain. Les quatre classes de vulnérabilité utilisées sont les suivantes:

1 - faible vulnérabilité
2 - vulnérabilité modérée
3 - vulnérabilité de modérée à élevée
4 - vulnérabilité élevée

CLASSE 1 - FAIBLE VULNÉRABILITÉ MARAIS, MARÉCAGES RICHES EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS, TOURBIÈRES MINÉROTROPHES RICHES EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS ET TERRES LÉGÈREMENT SUBMERGÉES

Les effets des pluies acides sur les marais, les marécages riches et les terres légèrement submergées devraient être négligeables (E. Gorham, comm. pers.). Les eaux de ces terres humides ont un pH presque neutre et possèdent un pouvoir tampon suffisant pour neutraliser l'apport acide des précipitations causé par l'enrichissement minérotrophe en calcium, magnésium, sodium et potassium. De plus, les eaux des marais et des terres légèrement submergées qui s'écoulent librement mettent les précipitations acides en contact avec des sources tampons.

Les effets des précipitations acides sur les tourbières minérotrophex riches (c'est-à-dire celles à forte alcalinité et à eaux minérotrophes) devraient être minimes en raison du pouvoir tampon des eaux de surface. Il y a toutefois des exceptions à cette règle. Des mesures saisonnières des eaux de surface d'une tourbière minérotrophe du sud de l'Ontario ont révélé une baisse du pH de 6,0 à 4,0 de l'automne au printemps (J. Riley, comm. pers.). Cette observation permet de supposer que l'accroissement de l'écoulement de l'eau causé par le dégel, combiné à l'inaccessibilité des sédiments minérotrophes gelés qui auraient pu neutraliser l'apport d'eau acide, ont provoqué cette baisse temporaire du pH. Les modifications à plus long terme de la chimie de l'eau, ou de la flore et de la faune, dues à de telles fluctuations du pH sont peu probables. Ce phénomène démontre que l'écoulement de l'eau influence de façon

importante toute modification des terres humides soumises à des retombées acides.

Dans la plupart des cas, le pouvoir hydrochimique neutralisant des marais, des marécages riches, des tourbières minérotrophes riches et des terres légèrement submergées recevant des précipitations acides, devrait empêcher toute modification importante de la terre humide ou des eaux d'évacuation. Les régimes hydrochimique et hydrologique de ces classes de terres humides sont tels que les pluies acides ne devraient y avoir qu'un impact minime.

CLASSE 2 - VULNÉRABILITÉ MODÉRÉE - TOURBIÈRES OMBROTROPHES

Les tourbières ombrotrophes sont intrinsèquement acides, mais certains estiment qu'elles peuvent être vulnérables aux effets préjudiciables des pluies acides (Gorham, 1958; Johnson, 1981; Bayley, 1983). Leur pH se situa à moins de 4,5; les bicarbonates n'y sont donc plus disponibles pour neutraliser l'apport des ions hydrogène contenus dans le pluies acides. Toutefois, des acides organiques et l'aluminium en présence de ces faibles valeurs du pH neutraliseront cette acidité (Johannesen, 1980). Le pouvoir d'échange cationique de la tourbe est déjà grandement saturé par les ions hydrogène engendrés par les mousses Sphagnum et n'assurera qu'une neutralisation limitée. La lenteur du déplacement de l'eau dans une tourbe bien décomposée (Bulavko, 1971) accroît le contact avec ces sources de neutralisation. Si le potentiel de réduction de l'acidité des tourbières oligotrophes venait à être épuisé, une augmentation de l'acidité causée par les pluies acides dans ce milieu à faible pH peut mobiliser les métaux toxiques comme l'aluminium, le zinc, le mercure et le cadmium, et déclencher la perte d'éléments nutritifs ou de cations de base. L'un et l'autre phénomène entraîneraient une inhibition de la croissance végétale qui pourrait être évaluée par des observations sur le terrain. Les pluies acides peuvent donc avoir des effets préjudiciables sur les tourbières ombrotrophes.

Le pouvoir interne de neutralisation des tourbières oligotrophes devrait réduire l'acidité du débit sortant, bien que la solubilisation de l'aluminium puisse être élevée et entraîner une augmentation des taux de dépôts acides. Ces terres humides ont donc été identifiées comme modérément vulnérables.

CLASSE 3 - VULNÉRABILITÉ DE MODÉRÉE À ÉLEVÉE - MARÉCAGES PAUVRES

Certains marécages pauvres en éléments nutritifs ne reçoivent qu'un apport minérotrophe minime. L'apport des ions nécessaire à l'échange de cations et l'effet tampon des bicarbonates sont limités. Leur pH est donc presque neutre et le dépôt d'acide peut rapidement épuiser son pouvoir de neutralisation existant. De même, l'écoulement de l'eau dans les marécages pauvres en éléments nutritifs peut souvent être canalisé, restreignant l'interaction des précipitations avec les substrats végétaux et sédimentaires. En présence d'un afflux important de précipitations acides (p. ex. fortes pluies, dégel printanier), il peut y avoir une baisse temporaire du pH de ces eaux qui ont contourné les sources de neutralisation. Le débit sortant ne serait donc pas neutralisé et son potentiel de contribution à l'acidification des eaux de surface est élevé. C'est pourquoi, certains marécages pauvres en éléments nutritifs pourraient être classés comme modérément à

très vulnérables aux précipitations acides. Ce scénario suppose que l'effet tampon des bicarbonates des eaux de surface est saturé, ce qui peut on non être le cas.

CLASSE 4 - VULNÉRABILITÉ ÉLEVÉE - TOURBIÈRES MINÉROTROPHES PAUVRES EN ÉLÉMENTS NUTRITIS

Certaines formes de toubières minérotrophes risquent d'être très vulnérables aux précipitations acides. Certains estiment que les tourbières minérotrophes pauvres en éléments nutritifs, et caractérisées par une faible alcalinité, une diversité floristique réduite, un faible débit de l'eau, un faible apport minéral des sols environnants et des complexes d'échange cationique uniquement disponibles en surface de la tourbe, sont très vulnérables à l'acidification (Gorham et al, 1984). Le pouvoir tampon des bicarbontes y serait rapidement consommé par les précipitation acides, en raison de leur faible alcalinité et de leur apport limité en carbonates. Un afflux d'ions hydrogène dans les précipitations acides lessiverait les bases des tourbes superficielles et entraînerait une baisse du pH des eaux de surface. Des modifications ultérieures de la composition floristique d'une tourbière minérotrophe pauvre peuvent entraîner l'invasion d'espèces de Sphagnum acidophiles. L'acidification naturelle conséquente de ces tourbières minérotrophes se traduirait par des changements biologiques découlant de la modification de l'environnement chimique déclenchée par l'acidification anthropique au fil de la transformation de la tourbière minérotrophe en tourbière ombrotrophe. Le débit sortant deviendrait de plus en plus acide, contribuant ainsi à acidifier les eaux de surface.

3.3 Conclusions

Le tableau 2 résume les critères et les classes de vulnérabilité examinés ci-dessus. Ils ne sont qu'une première approximation des facteurs intrinsèques déterminant la réaction d'une terre humide à des précipitations acides. L'étude de ces facteurs sur le terrain et en laboratoire permettra d'obtenir les preuves nécessaires pour corroborer or rejeter les indices proposés de vulnérabilité. L'étude des classes de terres humides de modérément à très vulnérables (p. ex. tourbières ombrotrophes, marécages pauvres et tourbières minérotrophes pauvres) permettra d'obtenir les données nécessaires pour connaître les effets de l'acidfication anthropique sur les terres humides.

4.0 LES RECHERCHES ACTUELLES SUR LES TERRES HUMIDES ET LES PRÉCIPITATIONS ACIDES

Les gouvernements fédéral et provinciaux de Canada et ceux des états des États-Unis d'Amérique ainsi que les chercheurs universitaires accordent de plus en plus d'attention aux effets des précipitations acides sur les terres humides (tableau 3). Nous vous présentons un bref résumé des études effectuées actuellement dans sept établissements de l'est de l'Amérique du Nord dont :

1) La University of Minnesota, Minneapolis
2) L'Institut des eaux douces, Winnipeg
3) Le Service canadien de la faune, Ottawa
4) L'Institut national de recherce sur les eaux, Burlington
5) Le ministre de l'Environnement de l'Ontario, Toronto
6) L'Université de Toronto, Toronto, et
7) La Direction générale des terres, Environment Canada, Ottawa

Tableau 2:

Classes de terres humides et leur vulnérabilité relative aux précipitations acides (Kessel-Taylor, 1985)

Classe de terre humide	Caractéristiques du sol	Chimie de la source d'eau principale	Débit de l'eau	Hydrochimie	Intervalle générale d'acidité (pH)	Vulnérabilité des terres humides aux dépôts acides
Marais	Principalement minéral: dépressions remplies d'une certaine quantité de tourbe	Minérotrophe	Eau stagnante libre; eau courante	Riche en minéraux – dépendant de sources d'eau souterraines	>6,0	Faible
Terres légèrement submergées (profondeur de <2 m)	Minéral	Minérotrophe	Eau courante et stagnante	Riche en minéraux – dépendant de sources d'eau souterraines	>6,0	Faible
Marécage riche en éléments nutritifs	Tourbe ou sol minéral	Minérotrophe	Eau à faible courant ou stagnante	Riche en minéraux – dépendant de sources d'eau souterraines	6,0-6,5	Faible
Marécage pauvre en éléments nutritifs	Tourbe	Ombrotrophe avec un peu d'eau minérotrophe	Lent	Apports minéraux modérés	4,5-6,0	De modérée à élevée
Tourbière minérotrophe riche en éléments nutritifs	Tourbe	Minérotrophe	Faible courant	Riche en minéraux – dépendant de sources d'eau souterraines	>6,0	Faible
Tourbière minérotrophe pauvre en éléments nutritifs	Tourbe	Ombrotrophe avec un peu d'eau minérotrophe	Eau stagnante ou à écoulement lent	Apports minéraux modérés	4,5-6,0	Élevée
Tourbière ombrotrophe	Tourbe	Ombrotrophe	Eau stagnante ou à écoulement lent	Pauvre en minéraux	<4,5	Modérée

Ce tableau est un résumé des caractéristiques générales de chaque classe de terres humides. Chaque classe comporte des exceptions.

Tableau 3: Faits saillants des recherches sur les précipitations acides et les terres humides effectuées dans l'est de l'Amérique du nord jusqu'en 1985

Organisme	Lieu	Sujet de l'étude
Département d'écologie et de biologie behavioriste, Université du Minnesota	Transect allant du Minesota à Terre-Neuve	• Écologie et biochimie des tourbières ombrotrophes à Sphagnum de l'Amérique du Nord comparativement à celles d'Europe • Surveillance de certains sites de tourbières ombrotrophes en vue de la détermination des tendances à long terme
Institut des eaux douces Pêches et Océans Canada	Zone expérimentale des lacs, Ontario	• Surveillance des effets de l'acidification artificielle d'une toubière ombrotrophe et d'une tourbière minérotrophe pauvre
Service canadian de la faune, Environnement Canada	Région de Wanapitei et du lac Ranger, Ontario	• Comparaison des variations du biotope des terres humides dans deux zones de précipitations acides • Caractérisation des habitats des terres humides
Direction générale des eaux intérieures et Service canadien de la faune, Environnement Canada	Sud-ouest de la Nouvelle-Ecosse	• Impact des eaux organiques des tourbières sur la chimie des eau de surface
Direction générale des terres, Environnement Canada	Sud-ouest de la Nouvelle-Ecosse	• Évaluation du rôle de la gestion de l'utilisation des terres, de la gestion des pêches et des terres humides dans le déclin des populations de saumons dans les rivères
Section des écosystèmes aquatiques et terrestres, ministère de l'Environnement de l'Ontario	Région de Muskoka, y compris le lac Plastic, Centre de l'Ontario	• Surveillance d'un bassin hydrographique pour l'évaluation de l'impact des précipitations acides sur les systèmes aquatiques • Rôle des acides organiques dans la chimie de l'eau
Institut des études environnementales, Université de Toronto et Service canadien de la faune, Environnement Canada	Ontario : Dyden, lacs Turkey, Sudbury et Muskoka	• Accumulation de métaux chez le vison et la loutre

Nous présentons aussi des commentaires sur deux ateliers scientifiques traitant de certains aspects des recherches sur les précipitations acides et les terres humides.

4.1 University of Minnesota, Department of Ecology and Behavioral Biology (Dr. E. Gorham

Deux projets de recherche ont été conçus pour étudier la vulnérabilité des tourbières aux précipitations acides. Le premier est un projet d'évaluation de la vulnérabilité des écosystèmes de tourbières aux dépôts acides et aux polluants associés (Gorham et al, 1984). Une demande de financement du projet a été présentée à la National Science Foundation (États-Unis), mais aucune aide financière n'a encore été accordée.

Les objectifs de ce projet seraient d'étudier : 1) les processus chimiques intervenant dans l'acidification naturelle et anthropique des tourbières et 2) les réactions les plus importantes de la flore et des communautés végétales à l'acidification. L'approche consisterait à comparer l'évolution de la tourbière dans des tourbières minérotrophes pauvres exposées et non exposées à des dépôts acides considérables. Les conclusions tirées de cette recherche seraient ensuite vérifiées par une seconde étude comportant l'acidification expérimentale d'une tourbière minérotrophe pauvre.

Le deuxième projet, en cours depuis 1981, examine l'écologie et la biochimie des tourbières ombrotrophes à Sphagnum de l'Amérique du Nord, plusieurs études détaillées étant effectuées dans des endroits comme la tourbière ombrotrophe Luteher au Minnesota. Bien que cette étude n'aborde pas de façon particulière les effets des pluies acides sur les terres humides, certaines observations de l'influence générale de la pollution atmosphérique sur la chimie de l'eau des tourbières ombrotrophes ont été effectuées (Gorham et al, 1985).

Ce projet a pour objectifs : 1) d'examiner les facteurs environnementaux régissant la chimie des eaux des tourbières ombrotrophes, 2) de comparer la chimie des eaux ombrotrophes dans les régions continentale médiane et océanique orientale de l'Amérique du Nord avec celles de l'Irlande et de l'Angleterre et 3) d'analyser les causes de leur acidité.

Vingt-huit sites de tourbières ombrotrophes ont été choisis le long d'un transect allant du Manitoba à Terre-Neuve. A titre de comparaison, trois tourbières ombrotrophes du nord de l'Angleterre (dans les monts Pennine sud, où la pollution atmosphérique est grave) et deux tourbières ombrotrophes maritimes d'Irlande ont été incluses dans l'étude. Divers paramètres chimiques (p. ex. le pH, les concentrations d'ions, le carbone organique dissous) d'échantillons d'eau ont été analysés. La composition floristique complète en plants vasculaires, bryophytes et lichens a été déterminée dans chaque site, et des estimations ont été faites de la couverture végétale et de la répartition de chaque espèce. Des carottes ont été prélevées dans les tourbières ombrotrophes jusqu'au sol minéral de base afin d'obtenir des données sur les vitesses d'accumulation de la tourbe, la paléoécologie et la stratigraphie chimique. Les eaux de surface ont été échantillonnées et analysées pour déterminer la présence des principaux ions et des métaux à l'état de traces.

Les données hydrochimiques ont été interprétées en fonction de l'apport acide. On a constaté que les concentrations élevées de polluants n'étaient pas décelées dans les tourbières ombrotrophes recevant les émissions urbaines/industrielles d'oxydes de soufre et d'azote. Ce phénomène a été attribué à plusieurs facteurs. En premier lieu, l'azote qui est un élément nutritif essentiel des plantes et qui est souvent limité dans les tourbières ombrotrophes, est vraisemblablement absorbé par les plantes et s'élimine par la réduction microbienne et la dénitrification. Ces processus expliqueraient le fait que l'azote n'est habituellement pas décelable dans les échantillons d'eau ombrotrophe, malgré les fortes concentrations présents dans les précipitations le long du transect. En deuxième lieu, les concentrations de sulfates sont vraisemblablement diminuées par la réduction microbienne qui se produit près de la nappe phératique. Ceci expliquerait pourquoi les mesures moyennes de sulfate étaient sensiblement inférieures à celles des précipitations d'un bout à l'autre du transect (Gorman et al, 1985).

Des interprétations plus approfondies des données sur le sulfate et l'acidité ont été faibles récemment (Urban et al, 1985). Une tendance à la hausse des concentrations de sulfate d'ouest en est, dans le même transect, a été observée et corrélée au gradient de dépôt des sulfates. Il a toutefois été démontré que l'apport réduit de sulfate retenu dans les tourbières ombrotrophes dépendait énormément de facteurs hydrologiques. La fraction de sulfate résiduel diminuait à mesure que la fraction des précipitations se joignant aux eaux de ruissellement augmentait. Il a été établi que l'interaction entre le déplacement de l'eau et la réduction de sulfate empêchait de définir une charge fixe de sulfate qui entraînerait l'acidification des tourbières ombrotrophes. Certains estiment que les tourbières ombrotrophes échantillonnées dans le Maine subissent probablement une acidification anthropique.

Les bilans d'acidité ont été comparés un peu partout à travers le transect. Une très légère modification de l'acidité organique par opposition à l'acidité minérale a été observée, l'importance de cette dernière augmentant vers l'est le long du transect. Les auteurs ont conclu que les tourbières ombrotrophes de l'est étaient sujettes à être davantage acidifiées par les pluies acides en raison : 1) de la diminution du temps de rétention de l'eau dans ces tourbières ombrotrophes maritimes, qui entraîne une diminution correspondante de la réduction du sulfate et 2) des taux élevés de production d'acidité minérale et organique qui neutralisent le faible apport d'alcalinité.

On peut donc dire, en résumé, que les tourbières ombrotrophes ont un pouvoir important de réduction des sulfates. Ce pouvoir prend de plus en plus d'importance à mesure que le dépôt de sulfate augmente. Ces résultats ont incité Gorham et al (1985) à conclure que la réduction du sulfate rendait les effets de sulfate anthropique négligeables. La capacité des tourbières ombrotrophes à neutraliser les effets des pluies acides semble toutefois être limitée (Urban et al, (1985). M. N. Urban, Ph.D. poursuit certaines études de surveillance dans la tourbière minérotrophe de Luther au Minnesota.

4.2 Pêches et Océans Canada, Institut des eaux douces (Dr. S. Bailey)

Ce projet de Pêches et Océans Canada est destiné à fournir des données de base pour les essais futurs d'acidification d'une terre humide. L'étude se déroule dans la zone expérimentale des lacs (ZEL), dans le nord-ouest de l'Ontario, une région qui reçoit de faibles niveaux de précipitations acides. Le projet comporte la collecte de données de base avant l'acidification d'une tourbière ombrotrophe et la collecte de données pendant l'acidification même.

La première partie de l'étude fournit des données quantitatives et comparatives sur la végétation de certaines tourbières ombrotrophes. Ces données ont été analysées en fonction de variables chimiques et hydrologiques avant l'acidification artificielle (Bayley, 1983; Bayley et Schindler, 1985; Vitt et Bayley, 1984).

Les données sur la chimie des eaux de surface sont particulièrement intéressantes. Le pH, la conductivité rectifiée, l'alcalinité, Ca, Mg, Na, Mn, K, Fe, Cl, N_2O_3 et SO_4 des échantillons d'eau ont été analysés. Ces variables permettent de décrire les caractéristiques hydrochimiques des tourbières ombrotrophes qui reçoivent de faibles taux de précipitations acides. En plus de ces données qualitatives générales, des échantillons d'eau de surface d'une tourbière ombrotrophe particulière ont été analysés, chaque semaine, pendant une période sans glace, dans des stations situées à l'entrée et à la sortie des eaux de la tourbière ombrotrophe. On a ainsi pu établir les modifications de la chimie de l'eau provoquées par la végétation de la tourbière ombrotrophe. Les résultats révèlent que les concentrations de Ca, Mg, SO_4, N_2O_3 et l'alcalinité étaient beaucoup plus faibles à la sortie de la tourbière qu'à son entrée, tandis que la concentration d'ions hydrogène était beaucoup plus élevée dans le débit sortant. Les chercheurs ont mis en évidence des associations entre les paramètres physiques et chimiques et la structure des espèces dominantes. Les communautés végétales forment une série de gradients, les différentes espèces végétales occupant des habitats en chevauchement.

Les données sur l'état de ces terres humides avant leur acidification servent de point de comparaison pour les changements provenant de l'acidification artificielle. Nous disposons d'un grand nombre de données de base chimiques et physiques sur d'autres terres humides de la ZEL (Wickware et Rubec, 1976). Ces deux études offrent de précieuses descriptions des écosystèmes de terres humides dans une région recevant un minimum de pluies acides; ces données pourraient fournir des éléments de référence essentiels pour comparer les données prélevées dans des terres humides touchées par les pluies acides.

L'objectif de la deuxième phase du projet d'acidification est de déterminer les effets des concentrations et des volumes connus de sulfate, de nitrate et d'ions hydrogène sur la végétation et la chimie d'une tourbière minérotrophe pauvre dans une région qui reçoit actuellement de faibles taux de polluants atmosphériques (Bayley et Schindler, 1985). L'acidification a été réalisée à l'aide d'un mélange équimoléculaire à part égale de H_2SO_4 et de HNO_3 concentrés, ajouté à de l'eau pompée d'un lac voisin et pulvérisé par de petites buselures d'irrigation sur 2,66 ha

d'une terre humide, chaque mois, pendant la saison sans glace de 1984 et pendant trois mois en 1983. La durée de pulvérisation de l'eau d'irrigation (pH 3) durait de 4 à 5 heures. Il s'ensuivait une hausse du pH de l'eau du lac (5-7) qui durait 30 minutes.

Jusqu'ici, les résultats indiquent que les quantités de sulfate et de nitrate ajoutées à la terre humide sont toutes disparues rapidement. Les dépôts de sulfate ont repris leurs concentrations de fond en moins de sept jours et ceux de nitrate après une seule journée. Des essais en laboratoire ont confirmé ces observations sur le terrain, car il a été démontré que Sphagnum spp. était capable d'éliminer ces rapports de sulfate et de nitrate moins de 12 heures après l'application. Les chercheurs ont observé que la réduction de sulfate se produisait dans les 10 cm supérieurs de la mousse saturée. Ce processus a par la suite été simulé dans des régions minérotrophes par ajout de sulfate pendant des périodes de pluies acides. L'ajout d'acide à Sphagnum spp. sur le terrain a entraîné une augmentation mesurable de la croissance. Les auteurs n'ont relevé aucun changement de la décomposition de la litière de Sphagnum contenue dans des sacs insérés dans la tourbière ombrotrophe exposée à la pulvérisation acide. Les feuilles de bouleau ont toutefois subi une décomposition plus accélérée dans la région acidifiée. En règle générale, les concentrations des métaux à l'état de traces (Al, Cu, Fe, Mn, Zn) n'ont pas augmenté en raison de l'acidification. L'acidification n'a eu aucun effet sur l'apparition de nouveaux insectes.

On prévoit poursuivre le programme sur l'acidification des terres humides. L'une des principales observations effectuée jusqu'ici est que la tourbière ombrotrophe semble être un milieu de captage pour les sulfates et les nitrates, sans causer d'effets dommageables évidents ou prématurés. Les chercheurs laissent entendre que les effets de l'acidification sur les terres humides sont un phénomène à long terme qui ne se manifeste qu'après une exposition prolongée aux polluants.

4.3 Environnement Canada, Service canadien de la faune, région de l'Ontario (Dr. P. Blancher)

Le Service canadien de la faune mène une étude sur les effets des dépôts acides sur la faune des terres humides dans les régions de Wanapitei et du lac Ranger, dans le nord-est de l'Ontario. Ces deux régions reçoivent des charges acides annuelles moyennes différentes (Blancher, 1984, 1985a, 1985b). La région de Wanapitei, au nord-est de Sudbury, a un taux d'acidification beaucoup plus élevé que celle du lac Ranger, au nord-est de Sault Ste Marie en Ontario. Le projet a débuté en 1984 et devrait se poursuivre jusqu'en 1986.

En 1984, un relevé préliminaire sur le terrain était effectué pour localiser les terres humides et déterminer les caractéristiques de leur végétation, des invertébrés aquatiques et de la chimie de l'eau en vue d'un relevé intensif sur le terrain en 1985 (Blancher, 1984). Les résultats de ce relevé initial indiquent que l'apport élevé des pluies acides sur les terres humides de Wanapitei se reflète dans la chimie de l'eau de ces terres, qui sont plus acides et ont de plus fortes teneurs en sulfate et en métaux que celles de la région d'étude du lac Ranger.

Les recherches se poursuivront afin d'établir de façon plus détaillée les caractéristiques

des habitats de terres humides de ces deux régions. Des données sur la morphologie de la tourbière, l'hydrologie, la physionomie, le type de tourbe, la chimie de l'eau, la flore et la faune ont été recueillies. La réaction de certains groupes d'espèces fauniques des tourbières aux précipitations acides est particulièrement intéressante. Des comparaisons seront établies entre les invertébrés aquatiques, les cyprinidés, les amphibiens reproducteurs, les oiseaux aquatiques, les oiseaux insectivores et les musaraignes des deux régions.

Ce projet vise particulièrement à déterminer s'il est possible ou non de déceler l'apport d'acide dans des régions recevant une faible charge. Les résultats préliminaires, qui concordent avec les conclusions de Urban et al (1985), laissant croire que des différences régionales sont discernables.

4.4 Environment Canada, Direction générale des eaux intérieures, Institut national de recherche sur les eaux (Dr. R. Bourbonnière)

La Direction générale des eaux intérieures examine l'impact des eaux organiques des tourbières sur les écosystèmes aquatiques en déterminant la contribution des acides organiques à l'acidité des eaux de surface. L'échantillonnage de certains lacs et rivières de Nouvelle-Écosse a débuté en 1984 et se poursuivra jusqu'en 1986.

Des échantillons saisonniers ont été prélevés dans des eaux colorées de tourbières ombrotrophes, dans celles de ruisseaux et de rivières à la tourbière Barrigton, dans les lacs Beaverskin et Pebbleloggitch et dans certains sites fluviaux du parc national Kejimkujik en Nouvelle-Écosse. Les travaux en laboratoire consistaient à fractionner la matière organique dissoute en acide humique et en six sous-fractions d'acide fulvique. Les résultats révèlent que les eaux de la tourbière ombrotrophe contiennent habituellement des fractions acides d'acide fulvique, tandis que l'eau des lacs associés avec des tourbières ombrotrophes ont des constituants organiques neutres et acides; on pense que la fraction neutre provient des eaux de 4mlssellement. Les rivières échantillonnées à un certaine distance de leur source avaient de forts pourcentages d'acide humique, ce qui indique que les modifications chimiques s'étaient produites dans des conditions plus aérées.

Les rapports portant sur les fractions d'aluminium présentes dans les échantillons d'eau de certains sites exposés à un stress acide sont en cours de rédaction (R. Bourbonnière, comm. pers.). Les futurs travaux consistent à surveiller les rivières Mersey et Clyde et les lacs Beaverskin et Pebbleloggitch en Nouvelle-Écosse.

Ces travaux sont effectués en collaboration avec M. J. Kerekes Ph. D. (Service canadien de la faune, région de l'Atlantique) qui participe au programme des bassins jaugés de la Kejimkujik, étudiant les effets aquatiques et terrestres du transport à grande distance des polluants atmosphériques. De 1978 à 1983, des données ont été prélevées dans trois bassins lacustres de cette région qui sont vulnérables aux précipitations acides. L'influence du drainage des tourbières sur la composition chimique de l'eau des lacs dans ces bassins versants est actuellement à l'étude.

Une analyse des données sur la qualité de l'eau des tributaires des bassins versants de

la Kejimkujik révèle que, même si les eaux colorées présentent une acidité organique considérable, le soufre d'origine anthropique augmente davantage l'acidité de ces eaux, notamment en période de fort débit (Kerekes, et al 1985a). Une étude des sources d'ions sulfate et d'acidité dans les terres humides et les lacs de Nouvelle-Écosse a permis d'établir que, pendant les mois sans glace, le sel de mer rectifiait l'intervalle des concentrations de sulfate d'environ 45 meq/L dans l'extrémité sud de la province, à 30 meq/L dans la région de la Kejimkujik, à moins de 17 meq/L dans les régions du Nord, pour une moyenne de 85 meq/L dans la région d'Halifax. Ces données reflètent la configuration du dépôt atmosphérique de sulfate (Kerekes et al, 1985b).

4.5 Ministère de l'Environment de l'Ontario, Section des écosystèmes aquatiques (et terrestre) (Dr. P. Dillon)

M. P. Dillon Ph. D. dirige un projet destiné à surveiller les flux ioniques dans vingt-quatre bassins versants de l'Ontario afin de déterminer les effets du dépôt d'acide sur ces systèmes lacustres. Bien que ces travaux ne portent pas directement sur les terres humides, quelques-uns des bassins versants à l'étude contiennent des régions de terres humides et c'est ainsi que des données particulières sur les précipitations acides et les terres humides ont été obtenues.

Les recherches ont permis d'évaluer l'importance des acides organiques par rapport aux acides minéraux entrant dans le lac Plastic, un lac entouré de marécages à conifères et Sphagnum. L'eau entrant dans le lac a été échatillonnée deux fois par semaine, pendant la fonte des neiges, au printemps de 1982 et analysée pour déterminer les concentrations des principaux ions. Les résultats révèlent que, à certains moments de cette période, le débit entrant du lac qui draine les marécages contribue énormement à l'acidité du système. Sur une base annuelle, les acides organiques ne sont toutefois pas la principale source d'acidité de ce bassin versant; c'est l'acide sulfurique d'origine anthropique qui en est la principale source. Pendant les débits de pointe, les anions sulfate (provenant du dépôt d'acide) dominent la chimie des anions, avec 83 pourcent du total. Ce pourcetage baisse en période de faible débit, pendant les mois d'été, en raison de l'anoxie saisonnière dans les marécages à conifères et Sphagnum en amont à cette époque. Ce n'est qu'à ce moment que les matières organiques deviennent la source la plus importante d'acidité (LaZerte et Dillon, 1984).

La surveillance de ces bassins versants se poursuivra dans l'avenir. Ces données continueront d'être une source de renseignements sur l'influence des terres humides sur l'acidité totale de ces bassins versants.

4.6 Université de Toronto, Institut des études environnementales (Dr. C. Wren)

M. C. Wren Ph.D. effectue une étude pour le service canadien de la faune, Environnement Canada, visant à évaluer l'accumulation de métaux chez le vison sauvage et la loutre en Ontario provoquée par les charges polluantes et leur disponibilité dans l'environnement (Wren et Stokes, 1985). Même si les terres humides ne sont qu'une partie de l'aire de répartition du vison et de la loutre, cette étude peut être utile pour définir les effets biologiques possibles des précipitations

acides sur la faune associée aux terres humides. Les travaux ont débuté en 1983 et devraient se poursuivre jusqu'en 1986. Les activités sur le terrain sont terminées et les efforts sont concentrés actuellement sur l'achèvement de l'analyse des teneurs en métaux des échantillons de tissus et de nourriture.

Quatre régions de l'Ontario ont été choisies pour cette étude: Dryden (rivières English-Wabigoon), les lacs Turkey, Sudbury et Muskoka. Les premières données révèlent la présence de différences régionales dans les teneurs en métaux. Le rapport final abordera le problème de l'accumulation éventuelle des métaux toxiques (provenant des dépôts atmosphériques et de leur mobilité accrue en raison de l'acidification) chez la faune et évaluera les dangers de toxicité des concentrations actuelles de métaux pour les populations de visons et de loutres en Ontario.

4.7 Environnement Canada, Direction générale des terres (Mad. I. Kessel-Taylor)

Le déclin et l'extention éventuelle du saumon atlantique (Salmo salar) dans le sud-ouest de la Nouvelle-Écosse ont été attribués à l'acidification des eaux de surface causée par l'accroissement des pluies acides. Un examen plus approfondi de cette région nous permet d'identifier plusieurs facteurs locaux uniques qui pourraient avoir un effet significatif sur la population locale de saumons et l'acidité des eaux de surface. Ce sont : 1) les méthodes historiques de capture du saumon; 2) les modifications des méthodes de gestion des terres et 3) la présence de sols et de terres humides acides qui contribuent à l'acidité naturelle des eaux de surface. Un examen de ces facteurs locaux et de leur rôle dans le déclin des pêches et l'acidification des eaux de surface peut aider à évaluer la relation existant entre les précipitations acides, l'acidification des eaux de surface et le déclin du saumon dans cette région.

Une étude de cas du déclin des populations de saumons atlantiques a été entreprise dans la rivière Clyde, dans le sud-ouest de la Nouvelle-Écosse. Les résultats révèlent 1) que, d'un point de vue historique, les méthodes de gestion du poisson ont à maintes reprises épuisé les stocks de poissons de la rivière, 2) que les mofifications de la gestion des terres ont augmenté l'acidité du sol en raison des activités de reboisement des régions ravagées antérieurement par le feu et coupées à blanc et 3) que les terres humides influencent énormément l'acidité des eaux de surface. Les précipitations acides et leur impact sur l'acidité des eaux de surface se sont ajoutées à ces facteurs. C'est la combinaison de l'ensemble de ces facteurs qui a contribué au déclin et à l'extinction du saumon atlantique dans cette région (Kessel-Taylor, 1986).

L'étude établit également une corrélation entre la superficie d'une terre humide au sein d'un bassin versant et les mesures de la qualité de l'eau de surface. Pour ce faire, neuf autres rivières de la Nouvelle-Écosse ont été choisies pour permettre d'établir des corrélations statistiques. On a constaté qu'il existait un lien entre les eaux fortement colorées et la superficie de terres humides d'un bassin versant dans sept des bassins sélectionnés. Dans les trois autres bassins versants où l'eau était limpide, les terres humides ne semblaient pas beaucoup influencer la qualité de l'eau et aucune relation avec la superficie de terres humides n'a pu être mise en évidence.

4.8 OTAN Atelier de recherches avancées sur les effets des précipitations acides sur les écosystèmes forestiers, agricoles et de terres humides, Toronto (Ontario), du 12 au 17 mai 1985.

Les participants qui ont pris directement part aux discussions sur le dépôt acide et les terres humides étaient Eville Gorham (É.-U.), John Lee (R.U.), Richard Clymo (R.U.), Noel Urban (É.-U.), Steven Norton (É.-U.), John Jeglum (Canada), Magda Havas (Canada), David Schindler (Canada), Suzanne Bayley (Canada) et Joseph Kerekes (Canada).

Il a été décidé, dès le début de la rencontre, que le terme plus spécifique tourbière devrait être utilisé de préférence à terres humides au cours des débats sur l'impact du dépôt acide, car les systèmes à pouvoir tampon élevé comme les marais et les marécages riches subiront vraisemblablement peu de stress. Les problèmes méritant d'être étudiés ont été cernés et les recommandations suivantes ont été faites en matière de recherche.

1. Il est nécessaire de poursuivre les études sur les bilans acidité/alcalinité des tourbières pour déterminer les sources et les zones de captage d'acidité, et pour permettre d'établir un classement relatif de l'importance des dépots acides dans l'acidification des écosystèmes. Le bilan hydrologique, le bilan ionique et les modifications microbiologiques associées au régime géochimique sont des facteurs tout aussi importants intervenant dans l'acidité d'une tourbière et qui devront être étudiés plus en profondeur.

2. Il faudrait entreprendre davantage d'essais d'acidification de tourbières. Ils devraient se poursuivre assez longtemps pour déterminer les modifications de la composition des communautés, les cycles biogéochimiques et le métabolisme en général.

3. Il faut effectuer des études paléoécologiques pour déterminer les types de modifications des propriétés des écosystèmes qui se sont produites avant d'entreprendre la surveillance. Ces analyses sont un atout complémentaire pour les activités de surveillance à court et à long terme des sites où se déroulent les essais d'acidification.

4. Il faut effectuer des essais permanents avec les espèces de Spagnum pour étudier les polluants gazeux et leurs transformations.

5. Il est essentiel de déterminer les effets des précipitations acides sur les essences forestières peuplant les tourbières ombrotrophes; il faudrait notamment effectuer des recherches sur les symptômes similaires à ceux observés chez certaines forêts de conifères terrestres soumises à des pluies acides.

6. Il faudrait continuer d'étudier les espèces de métaux à l'état de traces et leur mobilité. Il faut obtenir davantage de données sur l'influence de l'acidité sur la spéciation des métaux à l'état de traces et sur l'interaction des métaux et des acides organiques.

4.9 Environmental and Social Systems Analysts Limited (ESSA), Atelier sur l'Acidité organique, St. Andrews Nouveau-Brunswick), du 3 au 5 décembre 1985

Cet atelier, parrainé par Environnement Canada, et Pêches et Océans Canada, a donné lieu à un débat et à un tour d'horizon méthodique des sources et de l'importance de l'acidité organique dans les eaux de surface et de ses effets sur le biotope aquatique (ESSA, 1986). L'accent était mis notamment sur les processus qui contribuent à la production d'acidité organique, sur les interactions entre l'acidité organique et minérale, et sur leurs effets sur la solubilité et la spéciation de l'aluminium. Les terres humides ont été examinées en fonction de leur apport à l'acidité et à la modification de l'ensemble du milieu aquatique.

L'atelier a identifié plusieurs recherches à effectuer, en particulier :

1. un nouvel examen des données existantes sur les terres humides et les eaux de surface. Nous disposons actuellement d'informations précieuses sur la végétation, la chimie et la répartition des terres humides, lesquelles pourraient servir de base à des études futures;

2. une caractérisation plus poussée des constituants du carbone organique dissous des eaux de surface à l'aide d'une méthode qui relève les différences importantes entre les fractions ou les classes de composés;

3. des recherches sur le rôle des terres humides dans la régulation de la chimie des eaux de surface;

4) une caractérisation des types de terres humides, des mesures des substances chimiques qu'elles contiennent et qu'elles exportent, et

5) l'élaboration de modèles d'acidification des eaux de surface qui tiennent compte de l'acidité organique.

5.0 EXEMPLE D'UNE BASE DE DONNÉES SUR LES TERRES HUMIDES SERVANT À L'EVALUATION DES RESSOURCES RÉGIONALES MENACÉES : ONTARIO

On pourrait effectuer des évaluations régionales des effets des précipitations acides sur les terres humides, et de la quantité de ressources menacées en comparant les données biologiques et chimiques existantes de sites exposés à des pluies acides importantes et de sites non exposés. La présente section donne un aperçu d'une base de données accessible sur des tourbières en Ontario et qui pourrait servir de point de départ à une évaluation de la vulnérabilité des terres humides. Elle n'est mentionnée qu'à titre d'exemple d'application de base de données. Les bases de données similaires sur les terres humides et les tourbières du Nouveau-Brunswick, de la Nouvelle-Écosse, de Terre-Neuve et d'ailleurs pourraient être tout aussi appropriées à une évaluation de l'ensemble turbicole de l'est du Canada. L'objectif de cette analyse est d'étudier les paramètres des sources de données nécessaires pour obtenir une comparaison géographique de l'état des variables abiotiques et biotiques des terres humides soumises à des apports acides de divers degrés.

Il faut souligner que les résultats d'un tel relevé géographique n'établiraient qu'une corrélation entre l'apport mesuré d'acide et l'impact observé); les conclusions de ces type d'enquête desvront être vérifiées par des méthodes expérimentales (c.-à-d. par acidification artificielle) afin d'établir une relation de cause à effet entre les changements biotiques et la diminution du pH (ou des interactions secondaires des écosystèmes, comme l'augmentation des métaux à l'état de traces). De tels relevés ne devraient être considérés que comme des étapes préliminaires à la détermination de l'impact des précipitations acides, ne fournissant que des preuves initiales des composantes vulnérables de l'écosystème.

5.1 Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Commission géologique de l'Ontario, Projet d'inventaire des tourbières (M. J. Riley)

L'objectif principal du Projet d'inventaire des tourbières de l'Ontario consistait à évaluer le potentiel des dépôts de tourbes de la province. Cette étude est particulièrement pertinente à l'évaluation de l'impact des précipitations acides car elle a permis de recueillir une foule de données floristiques, hydrochimiques et chimiques sur la tourbe des terres humides d'un peu partout dans la province. Le projet a débuté en 1982 et devrait se poursuivre jusqu'en 1986. Les régions d'étude ont été choisies pour leur représentativité de lieux riches en tourbières. Les tourbières de ces régions ont fait l'objet de relevés afin d'obtenir des données sur les points suivants : l'établissement de cartes donnant l'élévation et les courbes de niveau, les calculs de volume, la classification des tourbières, les profils des types de tourbes et les profils d'humification de la tourbe. Les types de végétation turficole ont également été cartographiés dans les différents sites. Des rapports assez détaillés sur ces régions d'étude ont été publiés sous forme de rapports provisoires par la Commission géologique de l'ontario (Riley, 1983 et 1984). D'autres rapports sommaires sur la chimie et l'hydrochimie de la tourbe devraient être publiés en 1986.

Depuis 1982, une superficie totale de plus de 107 000 ha a fait l'objet de recherches, 152 sites ayant été étudiés en détail et 264 autres sites ayant été choisis pour des études de reconnaissances afin de formuler des recommandations pour d'éventuelles recherches détaillées.

Des sites particuliers de terres humides ont été définis selon le substrat, leur pourcentage de couverture forestière, leur pourcentage de souches, leur type de couvert, la microtopographie et les classes de tourbières. Des carottes de tourbes ont également été prélevées et analysées pour obtenir des données sur le pouvoir d'échange cationique, la conductivité, le pH-H_2O, le pH-$CaCl_2$, l'azote, le soufre, l'hydrogène et plusieurs métaux à l'état de traces (Hg, Ca, Fe, Pb, Al, P, K Mg, Mn, Cu et Zn).

Ces mêmes données pourraient servir à effectuer des études géographiques comparatives sur la vulnérabilité éventuelle aux précipitations acides des caractéristiques chimiques et biologiques des terres humides. Les régions à l'étude sont situées partout en Ontario et reçoivent donc diverses charges acides. Les caractéristiques de la végétation et de l'hydrochimie de cette étude pourraient être comparées avec des gradients de charge acide à

l'aide des données compilées par les réseaux de surveillance des dépôts (p. ex. CANSAP/ CAPMON) pour déterminer s'il existe ou non des corrélations entre l'apport mesuré et l'impact. Certaines terres humides pourraient également être choisies et servir à assurer une surveillance à long terme.

Les données obtenues par ce projet de l'Ontario pourraient notamment servir :

1. à localiser les régions de la province qui reçoivent une charge acide faible, modérée et élevée;

2. à sélectionner des terres humides d'une superficie à peu près équivalente et des types de tourbières comparables dans chacune des zones recevant des charges acides différentes;

3. à comparer les données floristiques de ces terres humides, en relevant la présence ou l'absence d'espèces indicatrices qui pourraient correspondre à des modifications de la chimie des eaux en raison de la charge acide, et

4. à comparer des données chimiques comme les concentrations de sulfate, de nitrate et de métaux à l'état de traces pour déterminer si les niveaux de pluies acides se reflètent dans les caractéristiques chimiques des terres humides.

5.2 Conclusions

Bien que les données du projet d'inventaire des tourbières de l'Ontario aient été recueillies pour établir les caractéristiques des tourbières et non pas l'impact des précipitations acides, elles peuvent aider à effectuer des évaluations de la vulnérabilité régionale et à choisir des sites de surveillance à long terme pour les terres humides. Les conclusions tirées de ces études pourraient servir de point de départ à l'évaluation des effets des précipitations acides sur les terres humides et, comme telles, aider à l'élaboration d'indices de vulnérabilité plus précis.

6.0 SOMMAIRE ET RECOMMANDATIONS

L'importance d'étudier l'impact des précipitations sur les terres humides est généralement reconnue, bien que le rôle des terres humides dans l'environnement et leur vulnérabilité aux dépôts acides soient encore mal connus.

Les rapports révèlent que les terres humides pauvres en éléments nutritifs sont des capteurs importants pour les ions sulfate, nitrate et ammoniac contenus dans les pluies acides. La quantité d'apports acides qui peut être assimilée sans que des changements se produisent dans le régime hydrochimique de ces terres humides vulnérables est censément limitée. Les classes de terres humides du Canada les plus vulnérables à l'acidification seraient les tourbières minérotrophes pauvres, les marécages pauvres et les tourbières ombrotrophes.

Seule l'évaluation initiale des réactions aux précipitations acides des terres humides a été entreprise. L'essai d'acidification artificielle d'une tourbières ombrotrophe de la région expérimentale des lacs de l'Ontario et des études de surveillance menées au lac Plastic en Ontario, dans la tourbière Luther au Minnesota et dans le parc national Kejimkujik en Nouvelle-Écosse, en sont quelques exemples. Certains ont également tenté d'effectuer des études régionales des terres

humides situées dans des régions touchées par les précipitations acides (Blancher, 1985; Gorham et al, 1985), mais il serait très utile d'effectuer des études plus globales dans l'est du Canada.

Il faudra entreprendre d'autres travaux pour déterminer les types de modifications que pourrait provoquer l'apport d'acide, afin d'identifier les dommages grâce à des indicateurs d'alerte avancée et afin de contrer les effets des précipitations acides sur les terres humides.

Recommandations

À partir des conclusions données brièvement dans chaque section de ce document, il est possible de formuler certaines recommandations à l'égard (i) des fonctions des terres humides et (ii) de la vulnérabilité des terres humides.

Fonctions des terres humides

1. Il faudra effectuer des études plus détaillées sur le bilan acidité/alcalinité et le bilan cation/anion (ionique) des terres humides pour évaluer les répercussions des précipitations acides sur ces écosystèmes.

2. Il est important d'effectuer d'autres essais d'acidification artificielle des terres humides pour expliciter la réaction des terres humides non exposées à la pollution acide.

3. Il faudra constituer un dossier concernant les effets des précipitations acides sur le fonctionnement normal de la végétation dans les terres humides, notamment dans des situations concrètes, lorsque les espèces y subissent des modifications et du stress.

4. Il faudra élargir l'étude des effets des précipitations acides sur les espèces floristiques indicatrices, notamment les Sphagnum spp.

5. Il faudra effectuer des évaluations des effets indirects des pluies acides sur la faune, par le biais de l'impact sur l'habitat et la chaîne alimentaire.

6. Il faudra effectuer d'autres études sur les bilans hydrologiques des terres humides, notamment sur le rôle de l'écoulement de l'eau, de la profondeur de l'eau, des vitesses de lessivage et des saisons.

7. Il faudra examiner plus en détail le rôle des acides organiques dans les terres humides et leurs interactions avec les métaux lourds et les métaux à l'état de traces, notamment dans la mesure où ils contribuent à l'acidification et à la modification d'un écosystème aquatique.

Vulnérabilité des terres humides

1. Il faudra effectuer des essais sur le terrain à partir des hypothèses et des critères initiaux utilisés pour élaborer la classification de la vulnérabilité des terres humides présentée dans ce rapport.

2. Il faudra effectuer des évaluations régionales et une synthèse de la documentation sur la répartition des classes de terres humides vulnérables dans l'est du Canada afin d'aider à évaluer les ressources aquatiques menacées et à élabo-

rer des modèles de réaction des écosystèmes aquatiques.

3. Il faudra aborder le rôle des variations naturelles des régimes hydrologiques par rapport à la vulnérabilité des terres humides.

4. Les études des biotopes et de la flore des terres humides le long de gradients d'acidité dans les différentes classes de terres humides du Canada seraient utiles pour identifier les espèces indicatrices de l'acidification. Celles-ci pourraient notamment comprendre les bryophytes, les algues microscopiques, les petits invertébrés et les amphibiens.

5. Il est important d'établir les variations régionales et naturelles de la flore et des biotopes de chaque classe de terres humides pour séparer correctement les influences d'origine anthropique des influences naturelles.

6. Lors de l'élaboration d'études d'impact et de surveillance des terres humides, il faudra tenir compte des aspects temporels des répercussions sur les terres humides, comme un "capacité d'assimilation" temporaire qui masque les effets à court terme.

7. Les classes de terres humides de modérément à très vulnérables, notamment les tourbières ombrotrophes, les tourbières minérotrophes pauvres et les marécages pauvres, devraient être, si possible l'objet d'un plus grand nombre d'essais de surveillance propre à chaque site et de relevés de la distribution régionale de terres humides.

7.0 BIBLIOGRAPHIE

Bache, B.W. 1984. Soil-water interactions. Phil. Trans. R. Soc. Londres, B305: 393-407

Bayley, S. 1983. Interim Report for Effects of Acid Precipitation on the Mobilization of Toxic Trace Metals From Bogs to Freshwater Fish Habitats. Institut des eaux douces, Winnipeg, Manitoba. 35 p.

Bayley, S. et D.W. Schindler. 1985. Sources of alkalinity in Precambrian Shield watersheds under natural conditions and after fire or acidification. Présenté lors de l'atelier de l'OTAN des recherches avancées sur les effets des précipitatons acides sur les écosystèmes forestiers, agricoles et de terres humides. Toronto, Ontario. Mai 1985. 29 p.

Blancher, P.J. 1984. Ecological Survey of Wetlands in the Wanapitei and Ranger Lake Study Areas (LRTAP). Service canadien de la faune, région de l'Ontario, Ottawa, Ontario. Inédit.

Blancher, P.J. 1985a. Background Information For the Study of the Effects of Acid Precipitation on Wetland Wildlife. Service canadien de la faune, région de l'Ontario, Ottawa, Ontario. Inédit.

Blancher, P.J. 1985b. Plan of Study for Looking at the Effects of Acid Rain on Wetland - Dwelling Wildlife. Service canadien de la faune, Environnement Canada. Région de l'Ontario, Ottawa, Ontario. Inédit.

Bourbonnière, R. Communication personnelle. 1985. Institut national de recherche sur les eaux, Direction générale des eaux intérieures, Environnement Canada. Burlington, Ontario.

Braekke, F.H. 1978. Ion transport and sulphur turnover in peatlands. I Effects of acid precipitation on peat monoliths under controlled temperature and groundwater regimes. Projet SNSF, IR37/78, 178 p.

Braekke, F.H. 1980a. Ion transport and sulphur turnover in peatlands. II. Soil and hydrochemical characteristics for peatland sites in south Norway. Projet SNSF, IR60/80, 86 p.

Braekke, F.H. 1980b. Sulphate dynamics in natural environments. Preliminary results from case study. Tiré de: Ecological Impact of Acid Precipitation. D. Drablos et A. Tollan (dir. de publ.). Compte rendu d'une Conférence internationale à Sandefjord, Norvège. P. 156-157. Projet SNSF.

Braekke, F.H. 1981. Hydrochemistry of high altitude catchments in south Norway. Medd. Norsk Institut for Skogforskning 36: 8-11.

Bulavko, A.G. 1971. The hydrology of marshes and marsh-ridden lands. Nature and Resources. UNESCO. 7(1): 12-15.

Canada-États-Unis. 1983. Exposé d'intention sur la pollution atmosphérique transfrontière. Groupe de travail I sur l'évaluation des répercussions, rapport final et annexes. Burlington, Ontario.

Carter, V., M.S. Bedinger, R.P. Novitzki et W.O. Mitchell. 1978. Water Resources and Wetlands. Tiré de: Wetland Functions and Values. The State of Our Understanding. Compte rendu d'un Symposium national sur les terres humides. P.E. Greeson, J.R. Clark et J.E. Clark (dir. de publ.) Lake Buena Vista, Floride. p. 344-376.

Clymo, R.S. 1983. Peat. Tiré de: Ecosystems of the World, Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor. 4A General Studies. A.J.P. Gore (dir. de publ.) Elsevier, New York, N.Y.

Cowell, D.W. 1980. Project proposal for initial wetland LRTAP research. Direction générale des terres, Environnement Canada, Burlington, Ontario.

Cowell, D.W. 1986. Assessment of Aquatic and Terrestrial Acid Precipitation Sensitivities for Ontario. Rapport APIOS (No. 86/009). Environnement Canada et ministère de l'Environnement de l'Ontario. Toronto, Ontario.

Cowling, E.B. 1979. Effects of acid precipitation and atmospheric deposition on terrestrial vegetation. Environ. Profess. 1: 293-301.

Cox, R.M. 1983. Sensitivity of forest plant reproduction to long-range transported air pollutants: in vitro sensitivity of pollen to simulated acid rain. New Phytol. 95: 269-276.

DesGranges, J.L. 1982. Les oiseaux sont-ils touchés par les pluies acides? Milieu 26: 21-23.

DesGranges, J. (dir. de publ.) 1985. L'acidité des lacs et les canards. Environnement Canada et Canards Illimités (Canada). Ste-Foy, Québec.

DesGranges, J.L. et M. Darveau. 1985. Effects of lake acidity and morphometry on the distribution of aquatic birds in southern Quebec. Holarctic Ecology 8(3): 181-190.

ESSA Environmental Systems and Social Analysts Ltd. 1986. "Brown Waters": Relative importance of external and internal sources of acidification on catchment biota. Atelier de travail n°5 sur le TGDPA. Bureau de liaison du TGDPA, Environnement Canada. Downsview, Ontario.

Evans, L.S. 1982. Effects of acidity in precipitation on terrestrial vegetation. Water, Air, and Soil Pollution 18: 395-403.

Ferguson, P., J.A. Lee et J.N.B. Bell. 1978. Effects of sulphur pollutants on the growth of Sphagnum species. Environ. Pollut. 16: 151-162.

Frank, A., L. Peterson et T. Morner. 1981. Lead and cadmium contents in organs of moose, roe deer, and hare. Svenk Veterinartidning 33: 151-156.

Glaser, P.H., G.A. Wheeler, E. Gorham et H.E. Wright. 1981. The patterned mires of the Red Lake Peatland, northern

Minnesota: vegetation, water chemistry and land form. J. Ecol. 69: 575-599.

Glooschenko, V. et W. Stevens. 1985. Sources of acidity in wetlands near Sudbury, Ontario. (Sous presse) Science of the Total Environment.

Glooschenko, V., W. Weller et C. Eastwood. 1985a. Distribution and abundance of amphibians in a pH-stressed area adjacent to Sudbury, Ontario. Rapport technique, Direction de la faune, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, Toronto, Ontario., 30 p.

Glooschenko, V., R. Baehre, et C. Wedeles. 1985b. Sampling design for study of metal accumulation in Ontario moose and deer. Direction de la faune, ministère des Richesses naturelles de l'Ontario. Toronto, Ontario. Rapport inédit.

Glooschenko, V., P. Blancher, J. Herskowitz, R. Fulthorpe et S. Rang. 1985c. Association of wetland acidity with reproductive parameters and insect prey of the Eastern kingbird (Tyrannus tyrannus) near Sudbury, Ontario, présentation d'affiches, Conférence internationale de Muskoka sur les précipitations acides. Dorset, Ontario. Septembre 1985.

Glooschenko, W.A. 1985. Communication personnelle. Institut national de recherche sur les eaux, Direction générale des eaux intérieures. Burlington, Ontario.

Goode, D.A., A.A. Marsan et J.R. Michaud. 1975. Water Resources. Tiré de: Muskeg and the Northern Environment in Canada. R. Radford (dir. de publ.) Compte rendu de la 12^{e} Conférence sur le Muskeg, p. 299-330.

Gorham, E. 1957. The development of peatlands. Q. Rev. Biol. 32: 146-166.

Gorham, E. 1958. Free acid in British soils. Nature (Long.) 181: 106.

Gorham, E. 1967. Some aspects of wetland ecology. Tiré de: Mémoire technique du Conseil national de recherche du Canada, Comité associé, Ressources géotechniques, n° 90, p. 20-38.

Gorham, E. 1985. Communication personnelle. Département d'écologie et de biologie béhavioriste, Université du Minnesota. Minnesota.

Gorham, E., S.E. Bayley et D.W. Schindler. 1984. Ecological effects of acid deposition upon peatlands: A neglected field of "acid-rain" research. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 41: 1256-1268.

Gorham, E., S.J. Eisenreich, J. Ford, et M.V. Santelmann. 1985. The chemistry of bog waters. Tiré de: Chemical Processes in Lakes. W. Stumm (dir. de publ.) Wiley and Sons, New York, N.Y. p. 339-363.

Gosselink, J.R. et R.E. Turner. 1978. The role of hydrology in freshwater wetland ecosystems. Tiré de: Freshwater Wetlands. Ecological Processes and Management Potential. K.E. Good et al (dir. de publ.) Academic Press. New York, N.Y.

Grigal, D.F. 1972. Plant indicators in ecology. Tiré de: Indicators of Environmental Quality. W.A. Thomas (dir. de publ.) Plenum Press, New York. p. 257-267.

Havas, M. 1980. A study of the chemistry and biota of acid and alkaline ponds at Smoking Hills, N.W.T. Thèse de doctorat, Université de Toronto. Toronto, Ontario.

Hemond, H.F. 1980. Biogeochemistry of Thoreau's bog, Concord, Massachusetts. Ecological Monographs 50: 507-526.

Hutchinson, T.C. et M. Havas (dir. de publ.) 1980. Effects of Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Press. New York, N.Y.

Johannesen, M. 1980. Aluminum: a buffer in acidic water? Tiré de: Ecological Impact of Acid Precipitation. D. Drablos et A. Tollen (dir. de publ.) Projet SNSF. p. 222-23.

Johnson, A.H. 1979. Evidence of acidification of headwater streams in the New Jersey pinelands. Science 206: 834-35.

Johnson, D.W. 1981. The natural acidity of some unpolluted waters in southeastern Alaska and potential impacts of acid rain. Water, Air and Soil Pollution 16: 243-252.

Kadlec, R.H. et J.A. Kadlec. 1979. Wetlands and water quality. Tiré de: Wetland Functions and Values: The State of Our Understanding. Compte rendu du Symposium national sur les terres humides. P.E. Greeson, J.R. Clark et J.E. Clark (dir. de publ.) Lake Buena Vista, Floride. p. 436-456.

Kerekes, J., S. Beauchamp, R. Tordon et T. Pollock. 1985a. Sources of sulphate ions and acidity in wetlands and lakes in Nova Scotia. Manuscrit B-2-p 67. Présenté lors de la Conférence internationale de Muskoka sur les précipitations acides. Dorset, Ontario. Septembre 1985.

Kerekes, J., S. Beauchamp, R. Tordon, C. Tremblay et T. Pollock. 1985b. Organic versus anthropogenic acidity in the tributaries of the Kejimkujik watersheds in western Nova Scotia. Manuscrit B-2-p48. Présenté lors de la Conférence internationale de Muskoka sur les précipitations acides. Dorset, Ontario. Septembre 1985.

Kessel-Taylor, I. 1986. An Examination of Alternative Causes of Atlantic Salmon Decline and Surface Water Acidification in Southwest Nova Scotia. Document de travail n°46, Direction générale des terres, Environnement Canada. Ottawa, Ontario. 42 p.

Kessel-Taylor, I. 1985. Wetland Sensitivity to Acid Deposition in Canada. Bulletin d'information provisoire sur la recherche sur les précipitations acides. Inédit. Conservation et Protection. Environnement Canada. Ottawa, Ontario

LaZerte, B.D. et P.J. Dillon. 1984. Relative importance of anthropogenic versus natural sources of acidity in lakes and

streams of central Ontario, Can. J. Fish. Aquat. Sci. 41: 1664-1677.

Li, L.K. 1985. Acid Precipitation Sensitivity Evaluation of Quebec. Tiré de: la classification écologique du territoire n° 20. Partie B, p. 79-87. Direction générale des terres, Environnement Canada. Ottawa, Ontario.

Likens, G.E. et F.H. Bormann. 1974. Linkages between terrestrial and aquatic ecosystems. Bioscience 24: 447-456.

Livingston, R.J. et O. Loucks. 1979. Productivity, trophic interactions, and food-wed relationships in wetlands and associated systems. Tiré de: Wetland Functions and Values: The State of Our Understanding. Compte rendu du Symposium national sur les terres humides. P.E. Greeson, J.R. Clark et J.E. Clark (dir. de publ.) Lake Buena Vista, Floride. p. 458-472.

Mattson, P., L. Albanus, et A. Frank. 1981. Cadmium and some other elements in liver and kidney from moose (Alces alces). Var Foda 8-9: 345.

McNicol, D.K., B.E. Bendell et R.K. Ross. 1985. Waterfowl and aquatic ecosystem acidification in northern Ontario. Présenté lors de la Conférence internationale de Muskoka sur les précipitations acides. Dorset, Ontario. Septembre 1985.

National Academy of Sciences. 1981. Atmosphere-Biosphere Interactions: Toward a Better Understanding of the Ecological Consequences of Fossil Fuel Combustion. National Academy Press, Washington, D.C.

Groupe national de travail sur les terres humides. 1986. Les terres humides du Canada. Dossier cartographique: a) Les régions à terres humides du Canada; b) La répartition des terres humides au Canada. Énergie, Mines et Ressources Canada et Environnement, Canada, Ottawa, Ontario.

Riley, J.L. 1983. Peatland Inventory Project. Rapport divers 116, Commission géologique de l'Ontario. Toronto, Ontario.

Riley, J.L. 1984. Peatland Inventory Project. Rapport divers 119, Commission géologique de l'Ontario. Toronto, Ontario.

Riley, J.L. 1985. Communication personnelle. Commission géologique de l'Ontario. Toronto, Ontario.

Rippon, J.E., R.A. Skeffington, M.J. Wood, K.A. Brown et D.J.A. Brown. 1980. Hydrogen, sulphur and nitrogen in soils and catchments. Projet SNSF, FR19/80.

Schnoor, J.L. (dir. de publ.). 1984. Modelling of Total Acid Precipitation Impacts. Ann Arbor Science Book. Ann Arbor, Mich.

Shilts, W.W., K.D. Card, W.H. Poole et B.V. Sanford. 1981. Sensitivity of Bedrock to Acid Precipitation: Modification by Glacial Processes. Commission géologique du Canada, Ottawa, Ontario. Document 81-14.

Tallis, J.H. 1964. Studies on southern Pennine peats. III. The behaviour of Sphagnum. J. Ecol. 52: 345-353.

Tarnocai, C. 1980. Registre des terres humides du Canada. Tiré de: Compte rendu d'un atelier sur les terres humides du Canada. C. Rubec et F.C. Pollet (dir. de publ.) Séries de la classification écologique du territoire, n° 12. Direction générale des terres, Environnement Canada. Ottawa, Ontario. p. 9-38.

Urban, N.R., S.J. Eisenreich et E. Gorham. 1985. Proton cycling in bogs: Geographic variation in Northeastern North America. Présenté lors de l'atelier de l'OTAN des recherches avancées sur les effets des précipitations acides sur les écosystèmes forestiers agricoles et de terres humides. Toronto, Ontario. Mai 1985. 26 p.

Van Dam, H., G. Suurmond et C.T. Braak. 1980. Impact of acid precipitation on diatoms and chemistry of Dutch moorland pools. Projet SNSF, FR19/80.

Vangenechten, J.H.D. 1981. Interrelations between pH and other physiochemical factors in surface waters of the Campine of Antwerp, Belgium: with special reference to acid moorland pools. Archiv. Fuer Hydrobiologie 90: 265-283.

Vitt, D.H. et S. Bayley. 1984. The vegetation and water chemistry of four oligotrophic basin mires in northwestern Ontario. Can. J. Bot. 62: 1485-1500.

Wetzel, R.E. 1975. Limnology. W.B. Saunders, Philadelphia, Pa.

Wickware, G. et C.D.A. Rubec. 1976. Ecological Land Classification of the Experimental Lakes Area, Northwestern Ontario. Dossier public et carte 1: 20 000. Direction générale des terres, Environnement Canada, Burlington, Ontario.

Wren, C.D. et P.M. Stokes. 1985. Metal accumulation in wild mink and otter in Ontario relative to environmental loading and availability. Rapport intérimaire. Service canadien de la faune, Environnement Canada, Ottawa, Ontario. Inédit.

ANNEXE I

DÉFINITIONS ET CLASSES DE TERRES HUMIDES AU CANADA

DÉFINITIONS ET CLASSES DE TERRES HUMIDES CANADA

Le Groupe national de travail sur les terres humides du Comité canadien de la classification écologique du territoire définit et décrit les cinq principales classes de terres humides du Canada dans les termes suivants (Tarnocai 1979).

LES TERRES HUMIDES sont des terres dont la nappe phréatique se situe au niveau, près ou au-dessus de la surface du sol, ou qui sont saturées d'eau suffisamment longtemps pour entretenir les processus propres au milieu humide ou aquatique, que l'on reconnaît à la présence de sols mal drainés, d'hydrophytes et de diverses formes d'activités biologiques adaptées à ce milieu.

Les TOURBIÈRES sont des types de terres humides où l'épaisseur de la tourbe dépasse 40 cm et sont associées à des sols organiques (à l'exclusion des folisols). L'accumulation de la mousse de tourbe dépasse seulement 10 cm en milieu pergélisolé.

La TOURBIÈRE OMBROTROPHE est une tourbière dont la nappe phréatique se trouve en général en surface ou près de celle-ci. La surface de la tourbière, qui peut être surélevée ou située au même niveau que les terres humides environnantes, n'est pratiquement pas touchée par les eaux souterraines riches en éléments nutritifs provenant des sols minéraux qui l'entourent; elle est de ce fait généralement acide et pauvre en éléments nutritifs. Les principaux constituants de la tourbe sont de faiblement à modérément décomposés, surmontant parfois une tourbe minérotrophe. Les sols sont essentiellement des fibrisols, des mésisols et des cryosols organiques. Ces tourbières, boisées ou non, sont généralement couvertes de Sphagnum, d'hypnées et d'éricacées.

La TOURBIÈRE MINÉROTROPHE est une tourbière dont la nappe phréatique se situe habituellement en surface ou au-dessus de celle-ci. Les eaux qui y circulent sont généralement riches en éléments nutritifs. Les principaux matériaux qui la composent sont une tourbe minérotrophe de bien à modérément décomposée et d'épaisseur variable. Les sols sont essentiellement des mésisols, des humisols et des cryosols organiques. La végétation se compose principalement de cypéracées, d'herbacées, de roseaux et de mousses brunes, ainsi que d'une couverture arbustive et, parfois, de quelques arbres épars.

Le MARAIS est une tourbière minérale qui est périodiquement inondée par des eaux stagnantes ou à écoulement lent. Le niveau d'eau, variable selon les saisons, laisse apparaître, aux périodes d'étiage, des plages de végétation entremêlée et des vasières. Les eaux sont riches en éléments nutritifs. Le substrat se compose normalement de matériaux minéraux et, parfois, de dépôts de tourbes. Les sols sont surtout des gleysols et, moins fréquemment, des humisols et des mésisols. La répartition de la végétation se fait selon un découpage par zones ou une mosaïque, tracée par des chenaux ou des mares qui isolent des peuplements de cyperacées, d'herbacées, de joncs et de roseaux émergés en bordure de prairies herbeuses et de bandes périphériques d'arbustes ou d'arbres. Diverses plantes aquatiques, submergées et nageantes, poussent en grand nombre dans les plans d'eau.

Le MARÉCAGE est une tourbière ou une terre humide minérale dont les étangs ou les chenaux

sont occupés par de l'eau stagnante ou à écoulement très lent. La nappe phréatique se trouve habituellement en surface ou près de celle-ci. Comme il se produit un important écoulement en provenance de la marge du marécage ou de d'autres régions riches en minéraux, ces eaux sont riches en éléments nutritifs. La tourbe, lorsqu'elle existe, se compose surtout de tourbe forestière bien décomposée, surmontant parfois une tourbe minérotrophe. Les sols qui y sont associés sont des mésisols, des humisols et des gleysols. La végétation se caractérise par un couvert dense d'arbres ou d'arbustes feuillus ou résineux, d'herbacées et de quelques mousses.

Les TERRES LÉGÈREMENT SUBMERGÉES (PLANS D'EAU PEU PROFONDE) caractérisent les terres qui sont périodiquement inondées ou ont un régime hydrologique stable selon les saisons; elles regroupent les vastes plans d'eau stagnante ou courante appelés étangs, mares, lacs peu profonds, bras morts, biefs, chenaux ou réservoirs. Ces plans d'eau peu profonde se distinguent des eaux profondes du fait qu'au milieu de l'été, leur profondeur est inférieure à 2 m et aussi des autres terres humides par des zones d'eau libre qui, l'été, occupent 75 pourcent ou plus de leur superficie. Les grandes zones d'eau libre qui ont une superficie supérieure à 8 hectares, devraient être classées dans une catégorie distincte comme plans d'eau libre, malgré la superficie ou l'étendue des zones de végétation qui les bordent. Les inondations périodiques peuvent augmenter la profondeur de l'eau, mais, en périodes de sécheresse, de faibles débits, de drainage ou de marée basse, les zones de rabattement peuvent être exondées. Les eaux peu profondes sont départagées des bas-plateaux et des terres humides avoisinantes par des lignes de rivage érodées ou par la limite extérieure des vasières, des tapis flottants de végétation, des plantes émergées ou des arbustes. S'il existe une végétation dans la zone d'eau libre, elle ne se compose que de plantes aquatiques, submergées et flottantes.